

Design of an Information System for Cultural Heritage

F. Soler¹, J.C. Torres¹, A.J. León¹, M.V. Luzón¹

¹Lab. Realidad Virtual, Universidad de Granada, Spain

Abstract

Usually the information that must be managed by archaeologist for any cultural heritage artefact is very heterogeneous. Due to its spatial nature this information cannot be easily represented with conventional data management frameworks. The strong spatial dependence of data concerning the object of study makes it interesting to have a three-dimensional model of the artefact to associate the large amount of information available. This paper presents a 3D information system that has been designed to manage cultural heritage information. The system allows to associate information layer to the artefact surface, following a GIS like approach. The association of information to the surface of the object allows to find out spatial relationships between different elements, making it easier to understand this information to both specialists and general public. The paper describes the system structure and functionality.

Categories and Subject Descriptors (according to ACM CCS): I.3.2 [Computer Graphics]: Graphics Systems—

1. Introducción

La gestión y el tratamiento de información es un problema importante dentro del ámbito de patrimonio cultural. Los estudios o procesos que se realizan sobre elementos de patrimonio cultural generan en la mayoría de los casos una gran cantidad de información heterogénea (valores numéricos, etiquetas, documentos de texto, imágenes, vídeos, bocetos) que debe ser tratada, almacenada y consultada de manera eficaz por parte del equipo de especialistas implicados en la actividad. En este sentido, las nuevas tecnologías han contribuido decisivamente a desarrollar herramientas software que permiten llevar a cabo tales tareas. Sin embargo, en muchas ocasiones el volumen de información que se maneja, su naturaleza o simplemente el tratamiento que requiere, exige al especialista herramientas o aplicaciones cada vez más avanzadas y eficientes adaptadas a sus necesidades.

Una de las características de la información que frecuentemente se trata sobre un modelo o yacimiento es la importancia de su distribución a lo largo del espacio tridimensional que ocupa el objeto. Por ejemplo, al efectuar la documentación inicial de un yacimiento, se requiere localizar y documentar en el espacio los distintos restos encontrados. Esta distribución o asociación de la información a su posicionamiento en el espacio permite a los especialistas de patrimonio cultural el poder realizar análisis o valoraciones más amplios de la información disponible. En el ejemplo

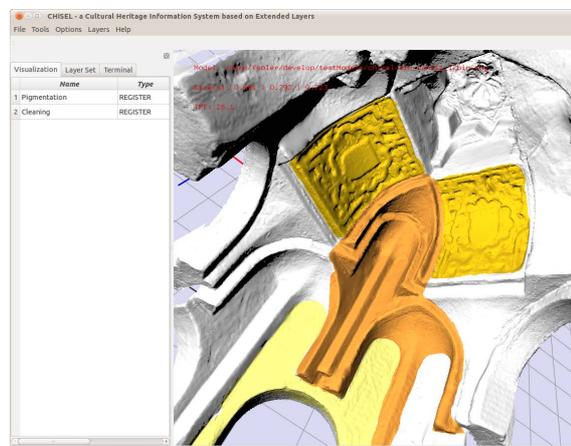


Figure 1: Prototipo de sistema de información basado en capas ráster definidas sobre la superficie 3D de un objeto.

del yacimiento, la distribución espacial de los restos podría facilitar el análisis acerca de las costumbres que tenían sus pobladores o el tipo de actividades realizaban.

En este trabajo se describe el diseño y desarrollo de sistemas de información de patrimonio en los que se trata de aprovechar esta relación entre la información a tratar y su distribución/asociación a la superficie del objeto. Esta apro-

ximación se basa en organizar la información en forma de capas raster sobre la superficie 3D del modelo, de manera similar a como se hace en los GIS (*Graphics Information Systems*). Como ejemplo, en la Figura 1 se muestra un modelo 3D digitalizado de la Sala de los Reyes de la Alhambra sobre el que se están visualizando un par de capas de información relacionadas con una actuación de limpieza y con la documentación de los restos de decoración. Estas operaciones no pueden realizarse con un GIS 3D. Una representación raster 3D requeriría demasiada información y no trabajaría con topología 3D, no con topología 2D sobre la superficie del elemento. Una representación vectorial 3D almacenaría propiedades a nivel de triángulo, con lo que la resolución estaría condicionada por la resolución de la digitalización.

Para asociar los elementos de información de las capas y la superficie del modelo se hace uso de una estructura de indexación espacial especialmente concebida y diseñada para establecer de manera efectiva dicha asociación. La estructura permite discretizar la superficie del modelo en elementos a los que se les asociará información mediante la correspondencia entre los elementos de indexación y los elementos de superficie que se incluyen en cada uno.

Como consecuencia, el sistema de información permite aprovechar toda la funcionalidad y eficacia que aporta la tecnología GIS aplicándola a la superficie del objeto:

- Tratamiento y gestión integral de toda la información relacionada con un objeto o yacimiento arqueológico. La información almacenada en capas permite incluir cualquier tipo de información: valores numéricos, registros de base de datos, información geométrica, archivos.
- Visualización de la información estructurada en capas directamente sobre la superficie del modelo. El sistema permite visualizar la información de cada capa asignándole una paleta de colores configurable por el usuario. De esta forma, es posible visualizar simultáneamente una o varias capas superponiendo unas sobre otras, asignándoles valores de transparencia o estableciendo filtros para visualizar solamente determinados valores de una capa.
- Consulta de la información gestionada. El sistema permite consultar información en dos sentidos: Por un lado se puede consultar, a partir de un punto de la superficie, qué valor o elemento de información de una capa está asociada a la superficie en dicho punto. Por otro lado se permite consultar, a partir de un valor o elemento de información, qué porción de superficie tiene asociada dicho valor.
- Histograma de distribución de la información sobre la superficie del objeto.
- Generación automática de nuevas capas de información: El sistema proporciona una gama de herramientas que permiten generar información sobre el modelo de manera automática. Por ejemplo, es posible generar nuevas capas de información a partir de operaciones aritmético-lógicas entre capas ya existentes en el objeto, de manera similar a cómo se realiza con la función *r.mapcal* de GRASS

[NM08]. Otras operaciones permiten generar nuevas capas a partir de información geométrica o atributos de la superficie del objeto. Por ejemplo, rugosidad, mapas de normales y orientación de la superficie con respecto a un vector.

El sistema de información propuesto usa como entrada una representación poligonal (una malla de triángulos) de la superficie del objeto de estudio. Esta representación 3D puede ser generada bien mediante un proceso de modelado tridimensional del objeto, o bien mediante un proceso de digitalización con un escáner láser.

Desde el punto de vista del diseño del sistema, el problema principal que hay que solucionar radica en cómo asociar la información a esa representación geométrica de la superficie del objeto para conseguir desarrollar toda la funcionalidad anteriormente expuesta.

2. Trabajos Previos

A pesar de que los primeros modelos 3D de elementos de patrimonio eran creados a mano mediante herramientas de modelado de propósito general, estos modelos han demostrado ser muy útiles en la catalogación, difusión y restauración del patrimonio cultural. Por ejemplo, Hodac [Hod01] usó la aplicación de *CAD Microstation* para construir un modelo digital del teatro barroco del Castillo Krumlov situado en Cesky. De hecho, cada vez se ha hecho más patente la utilidad de incorporar modelos digitales 3D.

Uno de los primeros intentos de representar las relaciones entre los distintos datos almacenados digitalmente fue llevado a cabo por Agnello [ACF*03]. Su propuesta se basaba en utilizar hipertexto para soportar las relaciones entre los distintos documentos digitales relativos a un sitio arqueológico. Los datos en formato digital que mantenía su sistema eran dibujos, imágenes, texto, sonidos e ilustraciones. Los distintos documentos en formato *html* que soportaban el hipertexto fueron generados usando *Macromedia Director*. El interface de acceso a los datos era un navegador Web que cargaba los documentos *html* y permitía el acceso a los datos mediante *URLs*. Para modificar y actualizar los datos, este sistema requiere el uso de *Macromedia Director* para editar los distintos archivos *html*. Partiendo de esta idea inicial los trabajos posteriores presentan otras estrategias de representación con el objetivo de flexibilizar la organización de los datos y las relaciones, además de permitir una actualización y modificación más sencilla para el usuario, tratando de hacer transparente al usuario la representación de los datos.

Podemos distinguir dos tipos de sistemas en función del papel que juega en el sistema el modelo 3D. Algunos sistemas utiliza los modelos 3D como un interface para acceder a la información digital, enlazándola con el modelo (o alguna de sus partes) [HSB*09], en otros, el sistema está diseñado para representar información que no tiene significado de manera independiente si no está situada sobre la superficie

del modelo 3D. El primer tipo de sistemas utiliza al modelo como un índice visual para acceder a la información, permitiendo de esta forma que el usuario pueda comprender mejor si dicha información está relacionada espacialmente mediante su enlace con el modelo. El segundo tipo de sistema permite interpretar cierto tipo de información situada sobre la superficie del modelo gracias a esta localización, lo que permite llevar a cabo un análisis del modelo gracias a la distribución de la información sobre este. En este segundo caso, la información necesita ser ubicada sobre el modelo para tener sentido por lo que dicho modelo no actúa simplemente como un índice espacial a la información. Este segundo matiz es la idea esencial que utilizamos para llevar a cabo nuestra propuesta de sistema de información para patrimonio.

Giunta [GDPECM05] usó un modelo 3D creado con *AutoCAD* de la fachada de la Catedral de Milán para ubicar información de niveles arquitectónicos: distribución de materiales, partes desaparecidas, bloques de granito reemplazados o eliminados. Estos elementos de información permitan llevar un registro de las distintas actuaciones de restauración que se llevan a cabo continuamente sobre el edificio. Este sistema utiliza la funcionalidad que incorpora *AutoCAD* para manejar niveles temáticos para referenciar los datos a almacenar. Cualquier modificación implica editar el nivel temático adecuado utilizando la herramienta. Así mismo, *AutoCAD* y sus niveles temáticos actúan como interfaz de acceso a la información.

Hodac [Hod05] propone la idea de crear un sistema de información espacial para elementos de patrimonio haciendo una descomposición en subsistemas dependiendo de la forma en la que va a ser utilizado el sistema: difusión de información, investigación, o gestión de la información. El modelo 3D se crea usando *MicroStation* y se exporta a *VRML* para segmentar ciertas áreas de este. De esta forma se permite el enlace de información textual a los distintos segmentos especificados en *VRML*. Una vez realizado este proceso el usuario puede acceder a la información a través de las áreas marcadas en el modelo 3D. Tanto la asociación de nuevos elementos de información como la creación de nuevas áreas segmentadas que son fuentes de nuevos enlaces requieren llevar a cabo de nuevo todo el proceso.

Meyer [MGP*07] planteó un Sistema De Información Web en el que la consulta de los datos podía hacerse utilizando como interfase modelos 3D. En su trabajo crearon mapas interactivos y modelos 3D que constituyen el interfase Web a datos multimedia almacenados en una base de datos MySQL. Los modelos 3D se especifican en formato *VRML* o *X3D*, su sistema permite visualizar diferentes partes de los modelos y asociar información de la base de datos. La modificación de datos y metadatos se realiza mediante formularios, evitando así que el usuario tenga que conocer detalles de la representación. Sin embargo, la creación de nuevas partes segmentadas en los modelos que permitan indexar nueva información debe realizarse editando los archivos en

formato *VRML* o *X3D*. El acceso a información relacional a través de una interfase proporcionada por modelos 3D es abordada también por Drap [DDS*06] pero únicamente para datos de fotogrametría. Aunque estas propuestas utilizan el modelo 3D como un interface para acceder a la información, también permiten llevar a cabo consultas directamente sobre la base de datos.

Havemann [HSB*08, HSB*09] propuso un sistema para asociar información multimedia descrita mediante archivos *XML* a un modelo 3D etiquetado con anotaciones en *XML*, a las que denominaron *3D markups*. El modelo propuesto soporta estos *3D markups* compuestos por una región en el espacio y una *URL*. De esta forma una anotación permite referenciar un documento multimedia, un modelo 3D o una parte anotada dentro de este. Además y de forma inversa, un usuario puede asociar un modelo 3D, o parte anotada de este, a una *URL* incluida en un documento *XML*. De esta forma el sistema permite que el usuario pueda explorar información de forma bidireccional entre los documentos multimedia y los modelos 3D. El sistema proporciona una herramienta al usuario para definir interactivamente partes del modelo, las cuales actuarán como *3D markups*, usando para la selección de dichas partes una esfera de radio variable por lo que el usuario no tiene conocimiento de la representación interna de estas referencias. Esta propuesta amplía la idea de los modelos 3D como elemento constitutivo del interface de acceso a la información para incluir un acceso bidireccional desde la información multimedia a los modelos y viceversa.

Guarneri [GPV10] también hace uso de modelos 3D para acceder a información. En este caso los autores hacen uso de una herramienta de modelado, *Blender*, para la simplificación previa de los modelos y para su segmentación. Cada una de las partes segmentadas del modelo se almacena en formato *X3D*. Los datos y metadatos se enlazan con una determinada entidad 3D añadiendo al archivo *X3D* una etiqueta de tipo *html* que contiene la *URL* a la página web donde serán mostrados. Por tanto, cada vez que el usuario necesite definir nuevas partes del modelo que actúen como enlaces a información serán necesario establecerlas previamente en *Blender* y después editar el archivo *X3D* generado para incluir la *URL* a la página Web que soportará la información referenciada.

Como se indicó previamente, la segunda forma en la que se han utilizado, aunque en menor medida, los modelos 3D en sistemas de información para patrimonio cultural es como soportes de información que no tiene sentido de forma aislada del modelo. Siguiendo este enfoque, Scopigno [SCC*03] no sólo propuso usar un modelo 3D como índice espacial a información relacionada con el objeto de patrimonio representado, sino que usó el modelo como soporte para integrar información de análisis de una actuación de restauración. La información podía ser recabada mediante diferentes procedimientos e integrada en el modelo digital o podía ser generada directamente mediante un proceso de simulación en la cual

el modelo era un elemento más de entrada. Otro trabajo que siguió este enfoque fue presentado por Dellepiane [DCPS08] proponiendo un método para sobreimponer información fotográfica sobre el modelo 3D con el objetivo de ayudar al restaurador. Se tomaron fotos del objeto antes de iniciar el proceso de restauración y al final de este, permitiendo al restaurador comprobar sobre el modelo 3D la apariencia antes y después de llevar a cabo la actuación.

Teniendo en cuenta el segundo tipo de utilización de los modelos 3D en sistemas de información de patrimonio, en este trabajo nos centramos en los fundamentos del diseño de una solución que se caracteriza por la estructuración de la información en forma de capas sobre la superficie del objeto. Las capas permiten asociar información de cualquier tipo: numérica o del tipo registro de una base de datos, a la superficie del modelo 3D, de forma interactiva y transparente al usuario. Es decir, las capas representan funciones que toman valores sobre la superficie del objeto. De esta forma no es necesario que el usuario utilice herramientas exteriores a la nuestra para asociar, actualizar o modificar información con respecto al modelo. Otra ventaja adicional es que no es necesario realizar ninguna segmentación previa de las partes del modelo a las que se va a asociar información. Siguiendo una estrategia similar a la de un GIS, es posible operar con las capas de información, lo que permite realizar consultas espaciales complejas y hacer análisis y simulaciones a partir de la información almacenada.

En la Sección siguiente se describe el proceso de discretización de la superficie usado como base para el mecanismo de asociación de información, descrito posteriormente en la Sección 4. En la Sección 5 se explica brevemente los fundamentos de la visualización de la información sobre el modelo. En la Sección 6 se expone la evaluación del prototipo software que se ha desarrollado según el diseño que se propone en este trabajo. Se finaliza con las conclusiones y los trabajos futuros en la Sección 7.

3. Clasificación Espacial de la Superficie del Objeto

Como se ha mencionado anteriormente, el sistema propuesto utiliza como entrada una malla de triángulos que representa la superficie del objeto. La base del diseño que planteamos en este trabajo, es un particionamiento de esta superficie en fragmentos de un tamaño máximo especificado por el usuario, a los que se puede asociar información. Este particionamiento se determina mediante el uso de un conjunto de celdas cúbicas o vóxeles pertenecientes a un índice espacial jerárquico. De esta forma, toda la superficie se encuentra discretizada. En concreto, en el sistema propuesto usamos como índice espacial un *octree*.

3.1. Estructura Octree de Indexación Espacial

La estructura en árbol *octree* permite particionar, en octantes y de forma recursiva, toda la superficie del modelo, de

forma que cada uno de los octantes contiene en su interior un fragmento de la superficie, dependiendo del número de subdivisiones empleado para generar dicho octante (Figura 2).

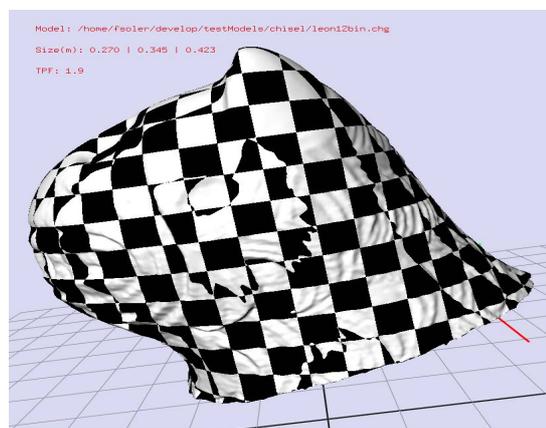


Figure 2: Discretización de la superficie usando un *octree* (simplificado en 2D).

En nuestra propuesta, el nivel máximo de subdivisiones empleado por el *octree* para discretizar la superficie del objeto vendrá determinado por el nivel de resolución requerido por el usuario en el tratamiento de la información del objeto en cuestión. Por ejemplo, si se requiere asignar información a fragmentos muy pequeños de la superficie, es necesario un nivel de resolución más elevado y, por tanto, un mayor número de subdivisiones en el *octree*. Este nivel de resolución del modelo es especificado por el usuario en el momento de importar en el sistema la representación 3D de la superficie del objeto. Fijado el nivel de resolución, se construye el índice espacial *octree* que estamos usando. El índice es construido una única vez cuando se importa el modelo.

En general, el diseño e implementación de un *octree* varía significativamente según el tipo de aplicación donde se vaya a aplicar. En el sistema de información que proponemos, el diseño del *octree* se ha adaptado especialmente a las características y requerimientos del sistema:

- La estructura de datos utilizada almacena de forma explícita únicamente las celdas del nivel de resolución más alto (mayor número de subdivisiones) que contienen en su interior algún fragmento de superficie del modelo, ignorando por tanto aquellas celdas que no contienen ningún fragmento de superficie o aquellas que se corresponden con nodos internos del *octree* que no alcanzan la resolución especificada durante la importación del modelo 3D del objeto.
- Cada una de estas celdas se representa usando un *octcode* o código de Morton [Mor66]. Se trata un código de localización espacial que codifica en una secuencia de bits el

camino que lleva a la celda a través de las distintas subdivisiones de nodos efectuadas en el *octree* (Figura 3).

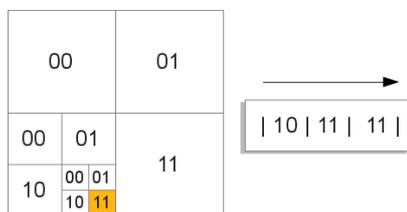


Figure 3: Estructura y codificación de los octcodes en un ejemplo simplificado 2D. Comenzando por la celda más grande, se van añadiendo de izquierda a derecha los códigos de los octantes que se van visitando hasta alcanzar la celda resaltada.

Algunas implementaciones de los códigos de Morton incluyen, dentro de la secuencia de bits, el nivel de resolución de la celda. En el diseño de nuestro sistema, esta información no es necesaria, puesto que todas las celdas se localizan a un mismo nivel de resolución.

- Se utiliza como única estructura de datos un vector unidimensional de *octcodes*, que son almacenados de manera ordenada según son visitados durante el recorrido en profundidad del árbol.

Como se aprecia, la estructura se ha diseñado con la intención de minimizar la cantidad de memoria necesaria para almacenarla y así poder alcanzar niveles de resolución más altos. En parte, este diseño tan sencillo ha sido posible porque la representación 3D del objeto es estática: la superficie del objeto es siempre la misma y, por tanto, la estructura *octree* que particiona la superficie no varía.

La construcción del *octree* conlleva clasificar espacialmente uno a uno cada triángulo incluido en la representación, obteniendo la lista con los octcodes de las celdas que son intersectadas por dicho triángulo. Estos octcodes que se van obteniendo son añadidos de forma ordenada a la estructura de array que soporta el *octree*. Como resultado de clasificar todos los triángulos, se obtiene el conjunto de todas las celdas del nivel de resolución indicado que engloban algún fragmento de la superficie del modelo.

3.2. Propiedades de los Octcodes

La estructura de *octcodes* posee algunas propiedades interesantes:

- La secuencia de bits que forma cada uno de los *octcodes* puede interpretarse como un valor numérico entero sin signo. En ese caso el array de *octcodes* se convierte en una array de números ordenados de forma ascendente, debido al recorrido en profundidad del árbol que se ha seguido para construir el array y a la codificación empleada para indicar el octante que se subdivide.

La principal consecuencia de esta propiedad es que se pueden efectuar búsquedas binarias de *octcodes* de celdas sobre la estructura con un orden de complejidad $n \log(n)$ siendo n el número de octcodes almacenados.

- Cada *octcode* representa una celda de máxima resolución que almacena un fragmento de la geometría de la superficie del modelo. Pero además, cada *octcode* incluye de manera implícita los octcodes de todas las celdas que se han generado durante el proceso de subdivisión hasta alcanzar la celda de máxima resolución. Estos octcodes pueden obtenerse considerando un número reducido de bits sobre la secuencia entera.
- Los *octcodes* de las celdas internas pueden ser de utilidad para generar representaciones del mismo *octree* a un nivel de resolución menor, esto es, con celdas de mayor tamaño que contienen fragmentos de superficie más grandes.
- De las dos propiedades anteriores, se desprende que todos los *octcodes* de las celdas que derivan (son hijas) de una celda interna del árbol se encuentran almacenados de manera contigua dentro del array. Esto permite efectuar de forma eficiente podas en el árbol.
- Es posible obtener octcodes de celdas vecinas en el árbol mediante operaciones sencillas de bits.

3.3. Indexación Espacial de la Información Geométrica del Objeto

La representación geométrica de la superficie del modelo que el sistema recibe como entrada está formada en última instancia por triángulos y vértices con información de color y normal. Para establecer la relación entre cada celda de la estructura octree y el fragmento de superficie que engloba, se realiza también un proceso de reclasificación espacial de dichos elementos.

Esta indexación permite que, dada una celda, se pueda acceder de forma directa a los vértices que incluye y a los triángulos que la intersectan. De esta forma es posible:

- Colorear la parte de superficie del objeto que engloba cada celda: cuando se visualiza la información de las capas sobre la superficie del objeto, los vértices y triángulos que representan el fragmento de superficie delimitado por cada celda se visualizan con un color en función de los valores de las capas para esa celda y de diversos parámetros de visualización. En la Sección 5.2 se describe cómo se efectúa el cálculo del color a cada celda.
- Estudiar relaciones topológicas entre celdas: Se trata de determinar la continuidad de la superficie a lo largo de las celdas del octree para poder realizar operaciones tales como, por ejemplo, establecer medidas sobre la superficie del objeto.
- Calcular capas de información que usen como base para el cálculo, datos sobre la geometría de la superficie que engloba cada celda. Por ejemplo: Área de superficie del objeto en el interior de cada celda, información de rugosidad, curvatura.

La asociación entre las celdas del *octree* y los elementos geométricos de la superficie que engloban se establece con un esquema similar al utilizado para establecer la relación entre las propias celdas y la información por capas del objeto, pero con algunas diferencias. El propósito de este diseño es facilitar un acceso homogéneo a toda la información referente a cada fragmento de superficie del modelo delimitado por una celda dada. Ambos tipos de asociación se tratan en la Sección siguiente.

4. Esquema de Asociación de Información

Los sistemas GIS tradicionales permiten asignar a la superficie terrestre información de atributos/capas de información de dos tipos diferentes:

- **Valores numéricos:** se incluyen valores enteros (con o sin signo), valores en coma flotante y valores en coma flotante con doble precisión. Este tipo de información permite representar fundamentalmente medidas de magnitudes (temperatura, peso, rugosidad, humedad...) y también otras como: número de recursos o elementos, información de tipo booleano, códigos o etiquetas.
- **Categorías o tuplas de datos:** en este caso, los elementos de información no incluyen un único dato numérico, sino un registro o tupla de información que incluye varios campos de datos. Estos campos pueden ser tipos de datos de muy distinta naturaleza: fechas, cadenas de caracteres, referencias a ficheros o imágenes. Este tipo de información es gestionada generalmente por un sistema de gestión de bases de datos.

En el diseño que se propone, los usuarios pueden definir capas de atributos de ambos tipos. Cada objeto o modelo gestionado por el sistema incluye una base de datos relacional independiente para dar soporte a los atributos/capas de categorías definidos en dicho objeto. Cada atributo de este tipo es almacenado en una tabla propia e incluye una valor de categoría -valor único entero sin signo- que funciona como llave primaria.

4.1. Asociación de Capas de Atributos a la Superficie del Objeto

El sistema que se propone en este trabajo hace uso de un mecanismo muy sencillo para asociar a la superficie 3D del modelo información de atributos perteneciente a los dos tipos de capas descritos arriba: Dado que la superficie se encuentra discretizada en fragmentos asociados a cada *octcode* de nuestra representación, es posible también representar la información relativa a un atributo o propiedad del objeto como otra secuencia de valores cuyo número de elementos es igual al número de celdas que contiene el índice espacial. De esta manera, un elemento de información o valor situado en la posición *i*-ésima de la secuencia se asocia directamente con el fragmento de superficie que incluye la celda también en dicha posición dentro del array de *octcodes* (Figura 4).

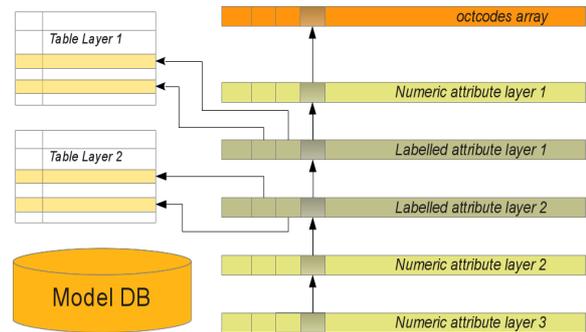


Figure 4: Esquema de asociación de atributos a la superficie del objeto.

Este esquema de asociación es la base de todas las funciones de gestión y representación de información dentro del sistema que proponemos. Bajo esta perspectiva, las capas de información se representan sencillamente como arrays o secuencias de valores con el mismo número de elementos que el array de *octcodes*. Este esquema permite efectuar consultas de una forma eficiente: dada una celda cualquiera es posible determinar la información asociada a la misma en las distintas capas definidas sobre el modelo.

En el caso de información representada por valores numéricos, estas secuencias o arrays de datos incluyen esos mismos valores. En el caso de información expresada mediante categorías o tuplas de atributos, los valores almacenados en estas secuencias corresponden a las claves primarias asociadas a los registros dentro de la tabla correspondiente a la capa.

Las claves primarias permiten obtener la información completa del registro asociado a la superficie del objeto mediante una consulta SQL al SGBD. La elección del valor numérico de la categoría usada como clave primaria no sigue un patrón preestablecido (no es autonumérica) y se deja en manos del usuario para que tenga la posibilidad de usarlo como campo de información extra: por ejemplo una codificación u ordenación relacionada con el registro.

Hay que tener en cuenta también que las capas de información no tienen por qué asignar un elemento de información para todas las celdas del objeto. Para determinar cuándo una celda tiene asignado un valor dentro de la capa se hace uso de un bit de valor válido (flag) incluido en cada elemento del array que representa la capa de información.

4.2. Asociación entre Elementos Geométricos y Celdas del *Octree*

La conexión entre elementos geométricos y atributos de las capas de información con las celdas del *octree* se diferencian básicamente en que, en el caso de los elementos geométricos, se asocian a cada celda un número indefinido

de elementos. Por ejemplo, una celda puede contener uno, cinco o ningún vértice en su interior. Además, un elemento geométrico podría estar conectado con varias celdas: un triángulo intersecta una o más celdas. Por estos motivos, la conexión entre elementos geométricos y celdas se establece con una estructura similar a la descrita para los atributos pero con algunas diferencias:

- En el caso de los vértices, se utiliza un array adicional de datos para almacenar la información de los vértices, mientras que el array de valores de la capa se emplea para asociar, como atributo a cada celda del *octree*, la posición del primer vértice en el array de vértices. Se parte de que el particionamiento de la superficie es disjunto, con lo que cada vértice se pueden localizar únicamente dentro de una celda.
- En el caso de los triángulos, se utiliza una estructura similar a la de vértices pero añadiendo otro array adicional para acceder indirectamente al array de datos de los triángulos. Esto permite no duplicar la información de un triángulo que esté conectado -intersecte- a varias celdas del *octree*.

5. Visualización de la Información

Para visualizar la información contenida en las capas, el sistema que se ha diseñado permite al usuario configurar los siguientes parámetros:

- Número de capas a visualizar simultáneamente. El conjunto de capas que se están visualizando en un momento dado es lo que denominaremos capas activas.
- Orden de visualización en las capas activas. La información de unas capas se visualizan sobre la de otras capas.
- Nivel de transparencia: Cada capa activa tiene un valor de transparencia que permite visualizar la información de las capas activas que están debajo.
- Filtros de valores: También es posible asociar un filtro a cada capa activa para restringir la información que va a visualizarse sobre el modelo.
- Paleta de color de cada capa activa.

5.1. Definición de Paletas de Color

La visualización de la información de cada capa está determinada fundamentalmente por la paleta de color que la capa tiene asociada en cada momento. En el sistema propuesto, la paleta de colores se representa mediante una lista de pares de la forma <valor de propiedad/atributo en R, color RGBA>.

Esta lista de pares permite definir una función definida a intervalos en la que cada valor de propiedad o atributo de una capa cualquiera tiene asignado un color único. Dicha función realiza la asignación de colores a valores de propiedad según el esquema siguiente:

- Para los valores de propiedad que no se encuentran entre dos pares <valor de propiedad en R, color RGBA> se asigna un color blanco con α cero.
- Para los valores de propiedad que se encuentran entre dos pares <valor de propiedad en R, color RGBA> se asigna un color interpolado entre los colores de ambos pares.

Esta asignación se aplica tal cual independientemente de si se trata de una capa de atributos numéricos o de categorías. En este último caso, el valor usado para el cálculo del color es la propia clave primaria de los registros.

Esta representación permite que las paletas de colores sean independientes de la capa a la que se asocian. Esto significa que las paletas pueden intercambiarse entre las capas e incluso entre los modelos que gestiona el sistema. Desde el punto de vista de la aplicación, esta característica es interesante para poder comparar la información relativa a una propiedad concreta sobre un conjunto de objetos o para correlacionar datos de naturaleza distinta usando los propios colores: el color asociado a la presencia de un determinado producto químico sobre la superficie del modelo puede asociarse al tratamiento que requiere esa zona de la superficie.

5.2. Síntesis de Color

Para visualizar información sobre la superficie del objeto, es necesario calcular, para cada celda del índice espacial, qué color final resulta de considerar todos los parámetros de visualización descritos arriba para cada capa activa en ese momento. Este color obtenido es el que se utiliza en última instancia, para renderizar el fragmento de superficie que incluye cada celda.

El cálculo de estos colores finales se efectúa dentro de un cauce o pipeline que se repite para cada capa activa y que incluye los parámetros y filtros arriba enumerados.

El resultado de aplicar el cauce de parámetros a cada capa activa permite obtener un color que se mezcla (blending) con el resultado parcial obtenido hasta ese momento.

Como resultado final de aplicar a cada capa activa este cauce se obtiene un array de colores con el mismo número de elementos que el índice espacial, pudiendo establecer como sucede con las capas de información, una asignación automática entre colores y celdas por sus posiciones en los arrays.

Hay que tener en cuenta que, cada vez que se realiza algún cambio en estos parámetros, es necesario recalcular de nuevo este array de colores.

6. Evaluación

Para evaluar la viabilidad y eficacia del diseño de sistema de información que se presenta en este trabajo, se ha desarrollado un prototipo software -CHiSEL- que implementa toda

la funcionalidad que se ha descrito. La aplicación se ha escrito en C++ usando OpenGL (<http://www.opengl.org>) y SQLite (<http://www.sqlite.org>) como sistema de gestión de base de datos. En la Figura 5 se muestra una captura del prototipo.

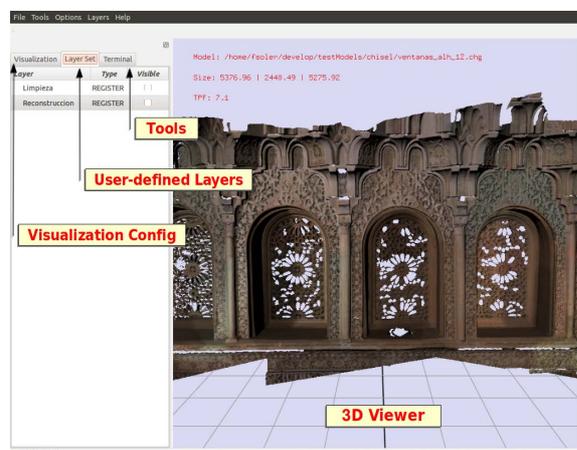


Figure 5: Aspecto del prototipo CHiSEL.

La interfaz Qt de CHiSEL dispone de los siguientes elementos:

- Un viewer o visor para mostrar el modelo actual y la distribución de la información en capas sobre su superficie.
- Un elemento tabular donde se pueden seleccionar las capas a visualizar y los parámetros de configuración de la visualización: paletas de color, niveles de transparencia y filtros de valores.
- Menús con las opciones que permiten al usuario importar o cargar modelos 3D, gestionar las capas de información, gestionar categorías y valores de las capas.
- Herramientas para realizar diversas consultas: información de una capa sobre la superficie del objeto, medidas sobre el modelo o estadísticas de área de superficie.
- Una herramienta de edición de capas que permite al usuario crear y editar capas interactivamente sobre el modelo 3D del elemento. Esta herramienta se puede utilizar mediante una tableta digitalizadora multitáctil.

6.1. Modelos 3D Utilizados en la Evaluación

Para evaluar CHiSEL se han utilizado varios modelos 3D obtenidos mediante digitalización con escáner laser de elementos de patrimonio que abarcan desde pequeñas piezas hasta modelos digitalizados de asentamientos o poblados:

- Una vasija ibérica encontrada en Puebla de Don Fadrique (Granada).
- La estatua de la Amazona Herida de Écija (Sevilla).
- Una bóveda de mocárabe de la sala de los Reyes de la Alhambra (Granada).
- El foso del anfiteatro de la ciudad de Itálica (Sevilla).

- El yacimiento arqueológico de Puente Tablas (Jaén).

Estos modelos han sido importados y gestionados desde CHiSEL usando PCs de bajo coste con las siguientes características:

- Procesador: Intel core i7 930
- 18 Gb RAM
- Tarjeta gráfica: NVIDIA GeForce GTX 460 1Gb
- SO: Linux Ubuntu 11.04 kernel 2.6.38-11
- Tableta digitalizadora: Wacom Bamboo Fun M

En la Tabla 1 se recogen los datos más significativos de estos modelos y algunos parámetros de su representación en CHiSEL.

Model Name	Octree Levels	Cells (Mn)	Occupacy (%)	Cell Size (mm)	Memory (MB)
Ancient Vessel	10	0,77	7,19%	0,21	5,89
9,14x9,85x10,52(cm)	12	12,36	1,80%	0,05	94,30
	13	49,44	0,90%	0,03	377,22
	14	197,78	0,45%	0,01	1.508,92
Wounded Amazon	10	0,30	2,83%	3,91	2,32
76,4x200,4x58,1(cm)	12	4,87	0,71%	0,98	37,19
	13	19,51	0,35%	0,49	148,85
	14	78,09	0,18%	0,25	595,75
Alhambra Ceiling	10	0,65	6,05%	9,57	4,95
354x490x239(cm)	12	10,53	1,53%	2,39	80,34
	13	42,20	0,77%	1,21	321,98
	14	169,00	0,38%	0,61	1.289,40
Itálica Amphitheatre	10	0,14	1,30%	294	1,07
150,76x78,4x17(m)	12	2,17	0,32%	74	16,57
	13	8,81	0,16%	37	67,19
	14	36,42	0,08%	19	277,83
Puente Tablas Site	10	0,14	1,27%	132	1,04
36,99x67,37x4,69(m)	12	2,21	0,32%	34	16,84
	13	8,84	0,16%	17	67,46
	14	35,40	0,08%	8	269,98

Table 1: Parámetros de los modelos de ejemplo importados en CHiSEL. De izquierda a derecha: nombre o denominación del modelo y tamaño de la caja englobante de la superficie, niveles del octree, número de celdas en millones, índice de ocupación del octree al nivel de resolución indicado, tamaño de celda en milímetros y espacio en memoria del octree en MB. usando octcodes de 64 bits.

Como se aprecia en los datos, la tasa de crecimiento en el número de celdas apunta a un límite en la resolución que dependerá básicamente de los recursos hardware disponibles para el sistema. En CHiSEL se utilizan octcodes de 64 bits que permiten representar, según la codificación mostrada en la Figura 3, hasta un límite de 22 niveles de resolución (21 subdivisiones) en el árbol. El tamaño de los modelos puede ser menor si se reducen los 64 bits usados por octcode a un número menor, reduciendo así el espacio en memoria ocupado por el octree. Esto tiene como efecto colateral la reducción de nivel máximo de subdivisión utilizable.

Por otro lado y, según las consultas realizadas a los especialistas en patrimonio, el tamaño de celda conseguido a los niveles de resolución que se muestran en la Tabla 1, parecen ser más que suficientes para las tareas de documentación y análisis que se llevan a cabo en su ámbito de trabajo.

6.2. Evaluación en Casos Prácticos

En el caso particular de los modelos pertenecientes a la vasija ibérica y a la estatua de la amazona herida, se han elaborado dos posibles casos de estudio que simularan sendas actuaciones sobre estos dos objetos con el objeto de evaluar la efectividad del sistema en situaciones reales de trabajo.

Para la vasija ibérica se ha simulado un análisis de pigmentación y de rasgos de la superficie. Este objeto presenta restos de la decoración original así como marcas y huellas de desgaste que pueden dar información acerca de la utilización que tuvo la pieza. Para el estudio de ambos elementos se han definido las siguientes capas de información:

- Uso de la pigmentación: una capa de categorías incluyendo los campos: color usado, grado de desgaste, tipo de motivo decorativo y observaciones.
- Desgaste de la superficie: una capa numérica cuyo valor representa un grado de desgaste dentro de una escala.
- Zonas de unión entre fragmentos: una capa numérica para indicar las zonas de conexión entre los fragmentos.
- Segmentación de fragmentos: una capa numérica para identificar cada fragmento.
- Marcas de la superficie: una capa de categorías con un único campo que incluye una descripción de la marca.

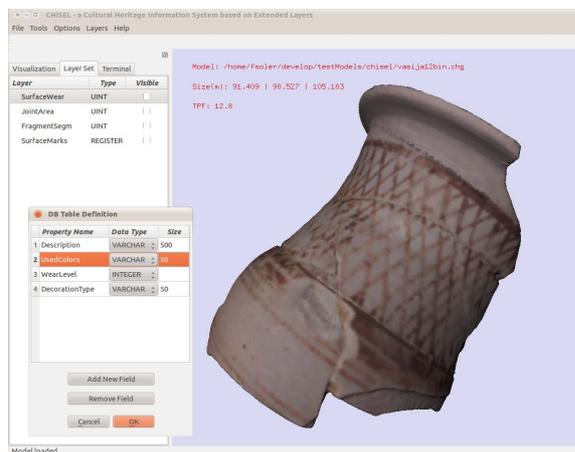


Figure 6: Vasija íberica en CHiSEL.

Además del objetivo de documentar toda esta información, estas capas permiten efectuar varios análisis sobre la pieza tales como, el análisis de áreas de la superficie especialmente dañadas, la detección y la medida de áreas de superficie donde ha desaparecido la pigmentación, el análisis

de los posibles usos de la pieza mediante la visualización combinada de la capa de desgaste y la capa de marcas sobre la superficie.

En el caso de la estatua de la Amazona Herida de Écija, el objetivo planteado para el caso de estudio fue simular la documentación del proceso de restauración llevado a cabo con anterioridad sobre dicha estatua. Tras su aparición en la piscina de las termas del yacimiento, la figura presentaba zonas con problemas de humedad y con abundantes residuos sobre la superficie.

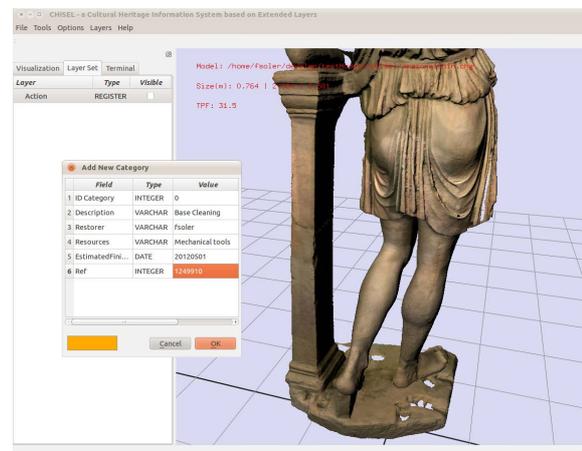


Figure 7: Amazona Herida en CHiSEL.

Para el proceso de documentación, se definieron las siguientes capas de información:

- Humedades: capa de información numérica indicando con un valor el grado de gravedad.
- Residuos que requieren limpieza mecánica del mármol: capa de categorías incluyendo los campos: técnica empleada, restaurador, fecha de la actividad.
- Decoración: capa de categorías incluyendo los campos: pigmento utilizado y una valoración del estado.
- Localización de las roturas reparadas.
- Localización de fisuras o grietas.

Independientemente de que el objetivo de este caso era el de documentar un proceso de restauración ya realizado, esto no evita que esta información pudiera ser utilizada para realizar algunos análisis como por ejemplo, visualizar zonas de potencial peligro de roturas mediante las capas definidas de roturas reparadas y fisuras o grietas.

Además de los dos casos de estudio que se han descrito, CHiSEL está siendo utilizado actualmente por dos equipos de especialistas en patrimonio cultural que pertenecen al Patronato de la Alhambra y Generalife (Granada) y al Conjunto Arqueológico de la ciudad de Itálica (Sevilla). El primer grupo está usando el prototipo en la restauración de las bóvedas de mocárabe en la Sala de los Reyes del palacio de

la Alhambra. En este contexto, CHiSEL está siendo de ayuda en tareas de planificación y documentación de acciones y cálculos de medidas de superficie. El grupo de especialistas de Itálica está usando un modelo 3D del anfiteatro para catalogar, datar y documentar elementos dentro del modelo.

7. Conclusiones y Trabajos Futuros

En este trabajo se ha presentado un enfoque novedoso para el diseño, desarrollo e implementación de sistemas de información para patrimonio cultural. Esta nueva estrategia se basa en la asociación de capas de información sobre la superficie tridimensional del objeto, permitiendo gestionar y visualizar sobre la misma cualquier tipo de información, distribuida espacialmente o no, relacionada con dicho objeto.

Esta asociación entre los elementos de información y la superficie del objeto se establece haciendo uso de un índice espacial *-octree-* que permite particionar dicha superficie en fragmentos más pequeños que son susceptibles de tener un valor asociado en las capas definidas sobre el objeto. El *octree* nos permite también clasificar espacialmente la información geométrica de la superficie de tal forma que se pueda utilizar para el cálculo de propiedades de la superficie del objeto. El diseño compacto de la estructura de datos del índice que se ha presentado permite alcanzar un doble objetivo: por un lado, establecer un mecanismo de asociación de valores a la superficie que sea eficiente y directo, y por otro, optimizar el uso de los recursos de memoria del sistema.

Para validar este nuevo enfoque, se ha desarrollado un prototipo de sistema basado en la estrategia que proponemos y se han realizado varias simulaciones sobre casos reales de documentación y análisis de objetos de patrimonio. Estos casos de uso han demostrado la validez de la arquitectura de sistema propuesta en situaciones reales de uso.

Como trabajo futuro, estamos planteando la posibilidad de incluir, junto con las capas de información ráster, otras capas de información de tipo vectorial. Este tipo de capas se contemplan ya en los sistemas GIS tradicionales y podrían ser de gran utilidad a los especialistas en patrimonio al hacer posible incluir sobre la superficie del modelo elementos tales como puntos, líneas o superficies con información asociada a los mismos. La inclusión de elementos vectoriales plantea como reto buscar nuevas formas de representar y asociar este tipo de información a la superficie de los modelos 3D.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Consejería de Innovación Ciencia y Empresa de la Junta de Andalucía a través del proyecto de excelencia PE09-TIC-5276. Los modelos mostrados en este trabajo son propiedad del Patronato de la Alhambra y del Generalife, del Conjunto Arqueológico de Itálica, del Museo Histórico Municipal de Ecija, del Museo de Puebla de Don Fadrique y del Centro Andaluz de Arqueología Ibérica.

References

- [ACF*03] AGNELLO F., CORSALE R., FRANCO V., BRUTTO M. L., MIDULLA P., ORLANDO P., VILLA B.: Cultural heritage and information systems, an investigation into a dedicated hypertext. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 34, 5 (2003). 2
- [DCPS08] DELLEPIANE M., CALLIERI M., PONCHIO F., SCOPIGNO R.: Mapping highly detailed colour information on extremely dense 3d models: The case of david's restoration. *Computer Graphics Forum* 27, 8 (2008), 2178–2187. URL: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1467-8659.2008.01194.x>. 4
- [DDS*06] DRAP P., DURAND A., SEINTURIER J., VANNINI G., NUCCIOTTI M.: Full xml documentation from photogrammetric survey to 3d visualization . the case study of shawbak castle in jordan. *The International Scientific Committee for Documentation of Cultural Heritage CIPA* (2006), 1–13. 3
- [GDPECM05] GIUNTA G., DI PAOLA E. B., CASTIGLIONE M. V., MENCIC L.: Integrated 3d database for diagnostic and documentation of Milan's cathedral façade. In *CIPA 2005 XX International Symposium* (Torino, Ital, September-October 2005). 3
- [GPV10] GUARNIERI A., PIROTTI F., VETTORE A.: Cultural heritage interactive 3d models on the web: An approach using open source and free software. *Journal of Cultural Heritage* 11, 3 (2010), 350–353. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1296207410000282>. 3
- [Hod01] HODAC:2001: Documentation of the baroque theatre at cesky krumlov castle. In *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXIV-5/C7. Potsdam, Germany, 2001, pp. 121–125. 2
- [Hod05] HODAC J.: 3d information system of historical site. *Proposal and Realisation of a Functional Prototype. Acta Polytechnica* 45, 1 (2005). 3
- [HSB*08] HAVEMANN S., SETTGAST V., BERNDT R., EIDE O., FELLNER D. W.: The arrigo showcase reloaded-towards a sustainable link between 3d and semantics. In *The 9th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST* (Braga, Portugal, December 2008). 3
- [HSB*09] HAVEMANN S., SETTGAST V., BERNDT R., EIDE O., FELLNER D. W.: The arrigo showcase reloaded-towards a sustainable link between 3d and semantics. *J. Comput. Cult. Herit.* 2, 1 (July 2009), 4:1–4:13. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/1551676.1551680>, doi:10.1145/1551676.1551680. 2, 3
- [MGP*07] MEYER E., GRUSSENMEYER P., PERRIN J., DURAND A., DRAP P.: A web information system for the management and the dissemination of cultural heritage data. *Journal of Cultural Heritage* 8 (2007), 396–411. 3
- [Mor66] MORTON G. M.: *A computer oriented geodetic data base and a new technique in file sequencing*. Tech. rep., IBM, Ottawa, Canada, 1966. 4
- [NM08] NETELER M., MITASOVA H.: *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach*. Springer, New York, 2008. 2
- [SCC*03] SCOPIGNO R., CIGNONI P., CALLIERI M., GANOVELLI F., IMPOCO G., PINGI P., PONCHIO F.: Using optically scanned 3d data in the restoration of michelangelo's david. In *Optical metrology for arts and multimedia* (2003), vol. 5146 of *Proceedings of the society of photo-optical instrumentation engineers (SPIE)*, pp. 44–53. 3