

Imágenes 2.5D basadas en información de reflectancia para la interpretación morfológica del patrimonio arquitectónico

García-Fernández, J.

School of Architecture, Tampere University of Technology, Tampere, Finland.

Resumen: La evolución de las técnicas de documentación digital y renderizado ha supuesto un cambio sustancial en la representación y preservación del patrimonio cultural en los últimos 20 años. En el campo de la fotogrametría, las imágenes por transformación de reflectancia (RTI, del inglés *Reflectance Transformation Imaging*) para la representación interactiva de las propiedades geométricas de superficies, resultan una herramienta eficaz en tareas de interpretación y conservación del patrimonio cultural. La necesidad de unas condiciones de luces y posiciones de cámaras específicas para su generación, han limitado su aplicación en la arqueología de la arquitectura, ciñéndose a objetos de pequeñas dimensiones: artefactos, esculturas, inscripciones, entre otros. El presente estudio propone un nuevo flujo de trabajo que elimine la dependencia a las condiciones externas y la escala, para la interpretación morfológica del patrimonio arquitectónico desde imágenes RTI: partiendo de la reconstrucción virtual tridimensional de escenarios basados en métodos fotogramétricos hasta la generación de imágenes RTI. El flujo será demostrado mediante la representación 2.5D de la topografía interior de los vestigios del Castillo de Villagarcía de Campos en España, para la identificación de trazas históricas no documentadas

Palabras clave: patrimonio arquitectónico, imágenes, digitalización, dimensión 2.5, representación gráfica.

2.5D images based on reflectance information for the interpretation of architectural heritage

Abstract: The evolution of the different documentation and renderization techniques has made substantial improvements in the representation and preservation of cultural heritage in the last 20 years. In the field of photogrammetry, Reflectance Transformation Images (RTI) for interactive representation of the geometric properties of surfaces, are an effective tool for the interpretation and preservation of cultural heritage. The need for specific light conditions and camera positions for RTI generation, have limited its application in the field of archaeology of architecture and urbanism, and has narrowed the application to small objects such as artifacts, sculptures, inscriptions, among others. This study proposes a new workflow that eliminates the dependence on external conditions and scale for representing surfaces of architectural heritage from RTI images. This workflow starts with the three-dimensional virtual reconstruction based on photogrammetric methods and concludes with the generation of 2.5D images based on RTI. The workflow will be demonstrated using a 2.5D representation of the interior topography of the ruins of the Castle Villagarcía de Campos in Spain in order to identify undocumented historical traces.

Key words: architectural heritage, imagery, digitization, 2.5 dimension, graphical representation.

* Autor para la correspondencia: jorge.garciafernandez@tut.fi

1. Introducción

Los escenarios históricos del patrimonio cultural presentan, en muchos casos, una transformación física (en ocasiones degradación) que dificulta tanto la representación como su interpretación histórica rigurosa. A día de hoy, la reconstrucción digital basada en imágenes y distancia se perfila como una de las herramientas que con mayor eficiencia permite el registro geométrico del patrimonio cultural. La variedad de métodos de adquisición y procesamiento de datos incorporados en la colección de *Shape from X* en Kersten (2010) posibilita ampliar el marco de aplicación de la fotogrametría en función de las variaciones de contexto, necesidades, y posibilidades económicas y técnicas. Sin embargo, existe una brecha entre la ingente cantidad de datos documentados y aquello que puede ser representado. La obtención de datos con información sobre las tres dimensiones no implica la capacidad para que el usuario visualice toda la información eficientemente en todas sus dimensiones.

Diversas soluciones basadas en la vectorización manual o automática (Figura 1c), los mapas de profundidad concebidos mediante la imposición de una escala de color sobre la superficie (Figura 1a), o imágenes estereoscópicas para la reconstrucción de la profundidad del escenario en nuestro cerebro (Figura 1b), ayudan a los investigadores a entender la morfología de escenarios en sus tres dimensiones.

El caso particular de patrimonio arquitectónico, con características singulares determinadas por la poca o ninguna variación perceptible en la cota de las superficies o terrenos respecto a la escala del proyecto (formas con tendencia a planicies

-superficies llanas-), hacen necesario el desarrollo e implementación de nuevas herramientas que faciliten su interpretación.

2. Imágenes por transformación de reflectancia – RTI

Una particularización interesante de los procesamientos digitales en función de la interpretación del patrimonio cultural es el cómputo de normales para la simulación de las propiedades de reflectancia de las superficies a través de imágenes 2.5D: *Imágenes por Transformación de Reflectancia – RTI (Reflectance Transformation Imaging)*.

Las RTI comprenden una serie de procesos y tecnologías para la captura de imágenes del objeto de estudio bajo diferentes condiciones de iluminación. Desde un punto de vista fijo y variando las condiciones de iluminación, las RTI son capaces de incorporar información de la reflectancia de la superficie mediante la estimación de luminosidad de imágenes 2D (detallado en la sección 2.1. *Principio de funcionamiento para RTI*). Como describe Earl *et al.* (2011), en la actualidad, RTI no sólo identifica un grupo de procesos y métodos que generan información de la reflectancia, sino también un formato de archivo que contienen al mapa de reflectancia como la 1/2 dimensión agregada en la representación 2.5D.

Mientras que las imágenes tradicionales (RGB) sólo imprimen en el registro de archivos información de color para cada píxel (Rojo-Verde-Azul), los datos procesados teniendo en cuenta las propiedades de reflectancia (RTI) incorporan la información relativa a la normal de las superficies tridimensional junto con la información RGB para

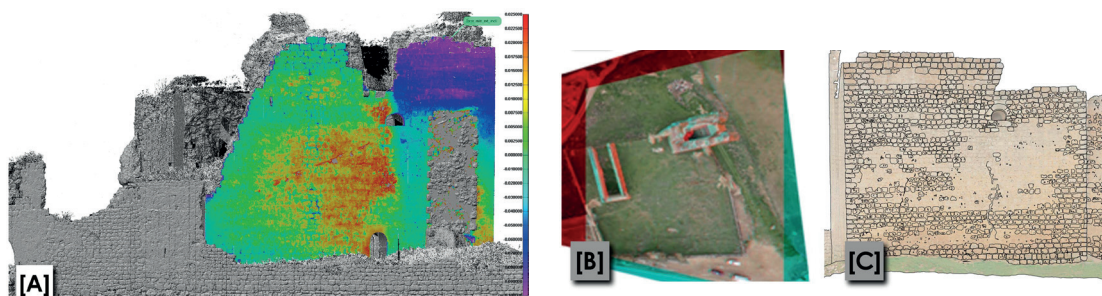


Figura 1. Diversas representaciones gráficas para la interpretación de superficies del Castillo de Villagarcía de Campos: [a] Mapa de profundidad; [b] Anaglifo del terreno; y [c] Plano vectorizado de fachadas.

cada píxel. Cada normal codificada en la imagen corresponde a un punto sobre el objeto y registra la medida de reflectancia de la luz (en ángulo) proveniente de cualquier dirección en ese punto, según Piquette (2011), dando lugar a la creación de un modelo 2.5D. Con ello es posible brindarle a nuestro cerebro información suficiente para reconstruir, de una manera más precisa, el objeto estudiado en sus tres dimensiones.

2.1. Principio de funcionamiento para RTI

Las imágenes por transformación de reflectancia son una particularización del método *Shape from Shading*. Este método, comúnmente utilizado en la reconstrucción de superficies de planetas desde fotografías tomadas desde vehículos espaciales, como detallan Ikeuchi y Horn (1981), permite reconstruir superficies tridimensionales desde un único punto de vista basándose en la respuesta a estímulos luminosos sobre superficies. Kimmel y Sethian (2002) definen los inicios de la solución del problema en las décadas de los 70' y 80', cuando se intentaba descifrar soluciones para la ecuación de luminosidad (*Partial Differential Equation - PDE*). El modelado general del método *Shape from Shading*, introducido por Horn y detallado por Prados y Faugeras (2006), definido por la PDE (1) permite conectar la *Luminosidad de la Imagen (I)* con el *Mapa de Reflectancia (R)*, siendo (x,y) coordenadas de un punto en la imagen.

Conocido que el nivel de gris en un píxel imagen depende de la posición de la fuente de luz y la normal a la superficie, mediante el método *Shape from Shading*, dado un valor de gris obtenido del fotograma, es posible reconstruir la fuente de luz y la normal a la superficie en cada píxel imagen, según demuestra Wahbeh, 2011. Para la modelización matemática, la mayoría de los estudios asumen para una mejor comprensión, el tratamiento de una escena lambertiana (Prados y Faugeras, 2003; entre otros), donde el mapa de reflectancia es el coseno entre el ángulo que forma el vector de la luz $L(x)$ y el vector normal a la superficie $n(x)$ (2).

$$I(x,y) = R(n(x,y)) \quad (1)$$

$$R = \cos(L,n) = \frac{L}{|L|} \times \frac{n}{|n|} \quad (2)$$

La Figura 2 muestra las relaciones generales entre la superficie objeto de estudio y sus condiciones de iluminación, la imagen fotográfica capturada (imagen 2D) y la imagen por transformación de reflectancia obtenida (imagen 2.5D). Weinsall (1994), y Prados y Faugeras (2006), amplían el estudio para la modelización matemática variando los sistemas de proyección, los tipos de fuentes de luz, así como la inclusión de regiones de conflicto (e.g. contornos ocultos, cambios bruscos de intensidad), entre otros.

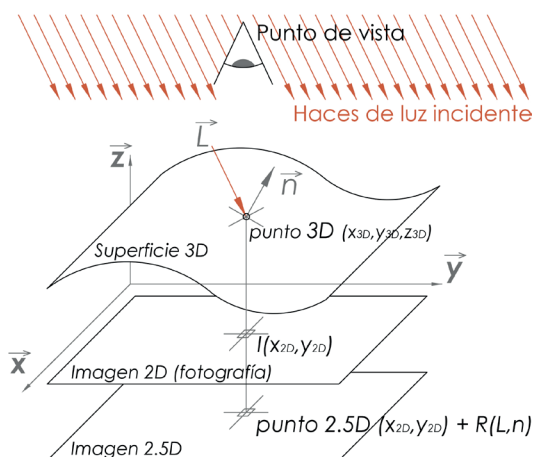


Figura 2. Relación entre el punto superficial, su proyección como píxel 2D y su replanteamiento como píxel 2.5D: coordenadas+mapa de reflectancia. Elaboración propia a partir de: Figura 1 en Prados y Faugeras (2003) y Figura 34 en Mudge et al. (2008).

2.2. Representación 2.5D: Las imágenes por transformación de reflectancia

La ganancia de realismo (o de su apariencia) en la representación de modelos tridimensionales ha sido uno de los grandes retos de los campos de visión computacional e informática gráfica en los últimos años. Para evitar el modelado y manipulación de complejas geometrías, las soluciones han apuntado al enriquecimiento de superficies con mapas de textura que simulan la apariencia tridimensional del objeto. Esta simulación introdujo la dimensión 2.5, también conocida como perspectiva $\frac{3}{4}$ o Pseudo 3D.

Si bien la 2.5 dimensionalidad a través de texturas planas (ráster) amplía la información acerca

de la disposición espacial de color o intensidad de una superficie, estas impiden una renderización realista de la escena, fundamentalmente para condiciones de iluminación distinta a las que fueron tomadas los mapas de textura. La búsqueda de una solución para mejorar la “planicidad” de las superficies representadas introdujo el mapeado no lineal o *Mapeado de Rugosidad* (Van Overveld, 1992). Su organización en teselas permite contener información relativa a la normal pero, según plantea Malzbender *et al.* (2001), presenta importantes limitaciones en la representación de regiones en sombra, fundamentalmente de sombra arrojada, o de regiones iluminadas debido a las reflexiones de luz de una superficie sobre otra.

Diferentes aproximaciones para la conexión de los mapas de reflectancia con unidad píxel han permitido la reducción de representaciones planas y lisas de la iluminación de la escena: Georghiadis *et al.* (1999), Debevec *et al.* (2000), entre otros. Sin embargo, la implementación de RTI de Malzbender y Gelb (2001) mediante el Mapeado de Textura Polinomial (*Polynomial Texture Mapping -PTM*), supuso un avance, no sólo por la simplificación del procedimiento de captura de datos (independencia de calibración de la cámara), sino también por la reducción del proceso de cálculo para la renderización interactiva en tiempo real.

Como parte las RTI, que basan su principio en la incorporación del mapa de reflectancia descrito paramétricamente, el ajuste PTM se basa en la correspondencia de una colección de imágenes, cada una de ellas con una iluminación desde diferentes posiciones conocidas y todas capturadas desde el mismo punto de vista. De una manera independiente en cada píxel, PTM ajusta un polinomio de orden inferior a las muestras tomadas en la captura de imágenes 2D. Esto permite la representación de las imágenes de funciones, en lugar de imágenes de colores, supliendo la distribución R-G-B en una función simple de la imagen tradicional, en una función de dos variables independientes I_u , I_v .

Las nuevas imágenes son suministradas a visualizadores que evalúan el polinomio en tiempo real de manera igualmente independiente por cada región. La modificación (estimulación) de las funciones asignadas a cada píxel (modos de

renderizado) producirá una representación 2.5D dirigida a acusar la información distintiva de ejes, cambios bruscos de altura y profundidad, texturas diferentes, entre otros.

3. Imágenes por transformación de reflectancia para el análisis morfológico del Patrimonio Arquitectónico

Mientras la dimensionalidad 2.5 ha sido ampliamente utilizada en la industria de los videojuegos, donde importa tanto el aumento de realismo como la disminución de la complejidad de modelos, en el campo de la geovisualización ha sido menos explotada.

En particular en el campo del patrimonio cultural, las imágenes 2.5D por transformación de reflectancia suponen una potente herramienta para el estudio morfológico de elementos patrimoniales. Su capacidad de documentar y representar superficies con tendencia a la planicie, donde las limitaciones de la inspección visual comprometen la interpretación, ha sido demostradas por Piquette (2011), Duffy *et al.* (2013), YDC2 (2014), entre otros.

La generación de RTI implica la precisa manipulación de las condiciones de luz y el posicionamiento del sensor en unas coordenadas determinadas. Para el caso del patrimonio cultural, ello se ha traducido en un flujo típico determinado por la creación de un espacio controlado física y lumínicamente (Figura 3) y secuenciado según las siguientes etapas:

1. Creación de espacio físico controlado y colocación de la pieza. Earl *et al.* (2011) proponen la configuración de domo para una distribución regular de cámaras y equidistancias a la superficie de análisis.¹
2. Captura de imágenes con condiciones especiales de iluminación y posición.
3. Mapeado de textura polinomial y generación de RTI.

¹ La necesidad de maximizar la ganancia de la información en relación con la geometría de la pieza a documentar, demanda estudios en profundidad sobre la creación de espacios controlados complejos tales como esferoides, elipsoides, hiperboloides, entre otros.

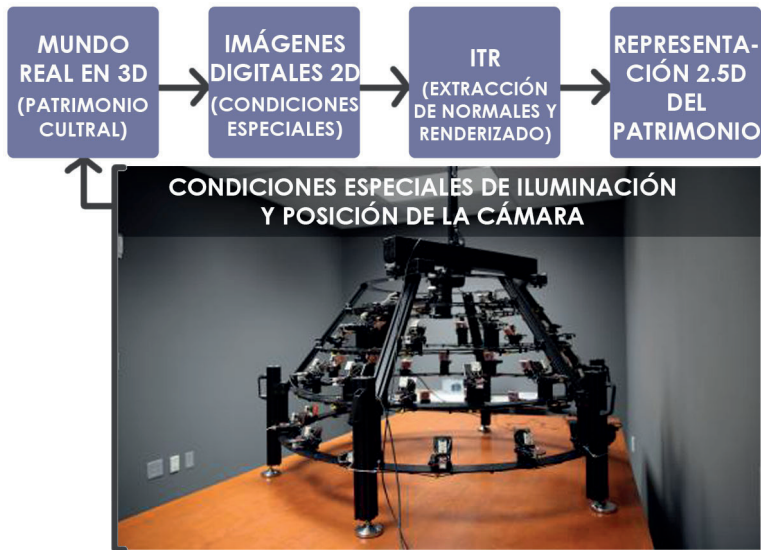


Figura 3. Flujo típico para la generación de RTI (imagen de domo RTI tomada de YDC2, 2014).

4. Representación interactiva mediante la estimulación de los polinomios.

La confinación del espacio limita la aplicación de RTI en el Patrimonio Arquitectónico, siendo sólo posible la representación 2.5D de aquellos elementos contenidos en la estructura de posicionamiento de sensores y luces, en general piezas de pequeñas dimensiones: artefactos, esculturas, inscripciones, entre otros.

Para solucionar las mencionadas limitaciones se propone un nuevo flujo de trabajo orientado a la generación de RTI para el estudio de morfologías a escala arquitectónica, donde resulte imposible el control de las condiciones de luz y posición de las cámaras.

La nueva secuencia, mostrada en la Figura 4, incorpora la creación de RTI como una parte del flujo fotogramétrico. La primera novedad del nuevo modelo se basa en el aprovechamiento de las capacidades de las nuevas técnicas de documentación basadas en imágenes o distancia, que permiten documentar escenarios sin límites de escala. De esta manera se plantea substituir la captura de imágenes 2D en un espacio confinado por la reconstrucción digital 3D precisa.

Las reconstrucciones digitales precisas desde técnicas fotogramétricas han dejado de ser un proceso costoso y dependiente de pesados equipos

con la implementación y desarrollo de algoritmos sobre los nuevos procesados. Su precisión puede estar por debajo del milímetro, toda vez que no depende de las dimensiones del objeto, sino de la calidad de imagen, la huella del píxel (GSD) y la efectividad de los métodos de reconstrucción. García-Fernández (2014) describe cómo los métodos como *Shape from Stereo* y *Structure from Motion* han tenido un importante auge con su implementación en software intuitivos y de bajo coste económico (e.g. Photomodeler, Agisoft, MICMAC, etc.). Además, la facilidad de documentación del patrimonio desde posiciones aéreas mediante el uso de UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*), permite ampliar el contexto de aplicación a entornos (escalas) urbanos.

Como se ha mencionado en la sección 2.1. *Principio de funcionamiento para RTI*, la precisión del método depende del cálculo riguroso de la orientación relativa del punto de vista y las luces. La obtención de las imágenes 2D para el procesado de imágenes RTI desde un escenario físico (Figura 3) supedita el cálculo de estas orientaciones a las condiciones electromecánicas del escenario físico o al reconocimiento semiautomático de la reflexión especular sobre dianas esféricas (Duffy *et al.*, 2013). Reconstruida digitalmente la superficie de estudio, un segundo aporte vital en la nueva configuración de trabajo consiste en la

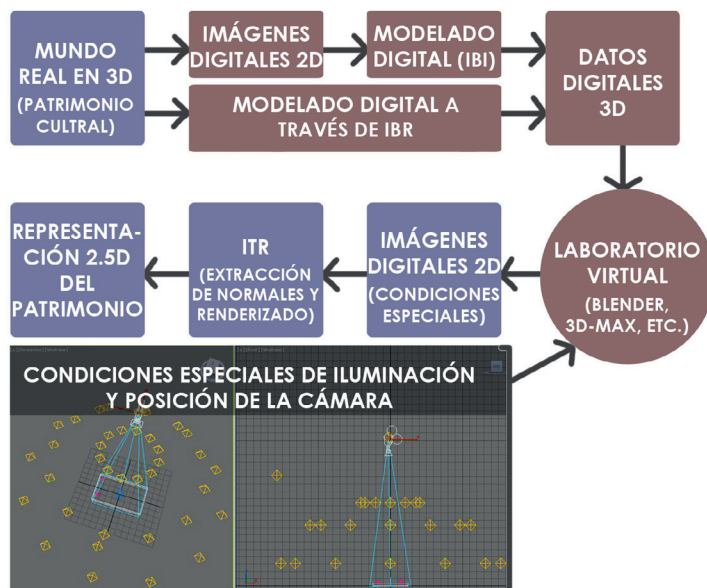


Figura 4. Nuevo flujo para la generación de RTI basado en el modelado desde técnicas fotogramétricas y gestión de los parámetros de la escena desde el laboratorio virtual.

posibilidad de modelar digitalmente el escenario y personalizar sus parámetros: posición espacial e intensidad de las luces, orientación relativa de la cámara, definición de bordes de sombra y eliminación de interferencias por otras fuentes de luz. De esta manera, las imágenes 2D para el procesado de RTI son creadas bajo condiciones ideales en un entorno digital de simulación, al que llamamos *Laboratorio Virtual*.

En nuestro caso, el laboratorio virtual queda definido por software de modelado y renderizado que permita definir con exactitud la configuración física de la escena. Soluciones gratuitas de código abierto como *Blender* o software estándares de la industria como *3D-Max* y *Maya*, contienen no sólo herramientas para un modelado espacial preciso, sino también un amplio rango de posibilidades en la renderización de la escena, mediante la idealización de los parámetros de control de la cámara (e.g. profundidad de campo, longitud focal, apertura de lente, etc.); y la gestión de diversos atributos de la iluminación y su relación con los materiales de la escena (e.g. exposición de rango dinámico, exposición de luz ambiente, iluminación cáustica, sombras, reflexiones, mezcla de colores, etc.).

Según lo descrito, se propone la siguiente secuencia de generación y visualización de imágenes por transformación de reflectancia (Figura 4):

1. Captura de pares estéreo y/o múltiples imágenes para la generación de modelo tridimensional preciso (desde métodos fotogramétricos).
2. Generación de modelo mallado del escenario.
3. Importación del modelo mallado en laboratorio virtual.
4. Obtención de imágenes con condiciones especiales de iluminación y posición.
5. Mapeado de textura polinomial y generación de RTI.
6. Representación interactiva mediante la estimulación de los polinomios.

4. Caso de estudio: Castillo de Villagarcía de Campos

El sitio seleccionado para la demostración de este estudio es el Castillo de Villagarcía de Campos, localizado en la provincia de Valladolid, España. Este castillo es un inmueble declarado “Bien de Interés Cultural” y uno de los principales exponentes de la tipología de Palacio-Castillo de los reinos de Castilla y León (Bajo Medieval), donde se conjugan las funciones residenciales con estructuras defensivas propia del medioevo, detalladas en Fernández *et al.* (2006). Su estudio cobra



Figura 5. Imágenes convergentes y paralelas desde posiciones terrestres y aéreas del castillo de Villagarcía de Campos, España.

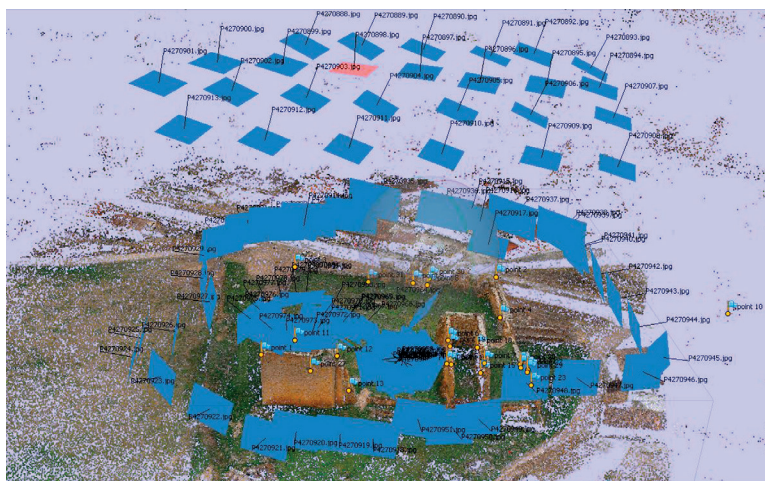


Figura 6. Posición de cámaras sobre la nube de puntos de correspondencia.

más sentido por la importancia histórica que le confiere haber sido la residencia de la juventud de Don Juan de Austria, hijo del Emperador Carlos V.

La insuficiente documentación histórica del yacimiento y su avanzado estado de ruina, hacen difícil la tarea de hipotetizar el estado original; así como la detección de rasgos característicos, objetivos de los organismos gubernamentales de la región para futuras labores de conservación. Fue objeto de análisis en particular la interpretación de

la topografía interior del castillo, caracterizada por una superficie aplanada de difícil acceso.

El estudio de la topografía interior a través de imágenes RTI partió de la reconstrucción rigurosa tridimensional. Fue realizada desde la captura de imágenes paralelas y convergentes desde posiciones aéreas y terrestres (Figura 5), y procesadas mediante el método fotogramétrico *Structure from Motion*, utilizando la aplicación informática Agisoft Photoscan (Figura 6).

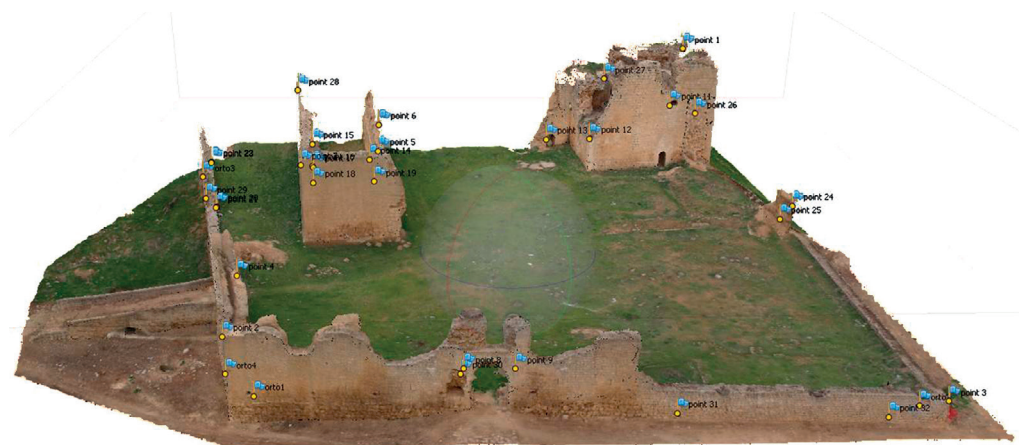


Figura 7. Modelo 3D riguroso del Castillo de Villagarcía de Campos obtenido desde *Structure from Motion*.

La obtención de un modelo malla (Figura 7), cumple con las condiciones del nuevo flujo de trabajo planteado en la sección 3, posibilitando la consecución del siguiente paso: importación del modelo malla a laboratorio virtual y obtención de imágenes 2D con condiciones especiales de iluminación.

Para el estudio presentado se ha eliminado la información de color con el fin de enfatizar sólo la reflectividad de la superficie y eliminar posibles pistas falsas que pudiera introducir el color heterogéneo de la baja vegetación existente en el yacimiento.

La información geométrica digital se ha importado en el laboratorio virtual constituido por aplicación de modelado 3DMax. Las luces se han distribuido uniformemente siguiendo la configuración del domo. La flexibilidad de esta plataforma virtual ha permitido idealizar las condiciones de toma, emisión y respuesta a la luz, reflectividad de material; así como escala y formato de las imágenes para su posproceso (Figura 8).

Conocida la posición espacial del foco emisor de luz y la cámara, la aplicación informática generadora de imágenes RTI es capaz de estimar automáticamente las normales a las superficies. Para la estimación de estas posiciones, en caso de que no sean previamente conocidas (casos donde se capturen las imágenes directamente sobre el objeto), será necesario incorporar en la escena esferas con propiedades reflectantes particulares, de manera que su región de reflectancia especular

(*highlights*) sea fácilmente identificable en los fotogramas.

La colección de imágenes resultante es procesada mediante creadores de RTI desde un ajuste polinomial (*Polynomial Texture Mapping*) y el archivo resultante incorporado a visualizadores interactivos, permitiendo implementar una serie de transformaciones matemáticas tanto a la normal de la superficie como a la información de color RGB. Como se ha mencionado, para ese

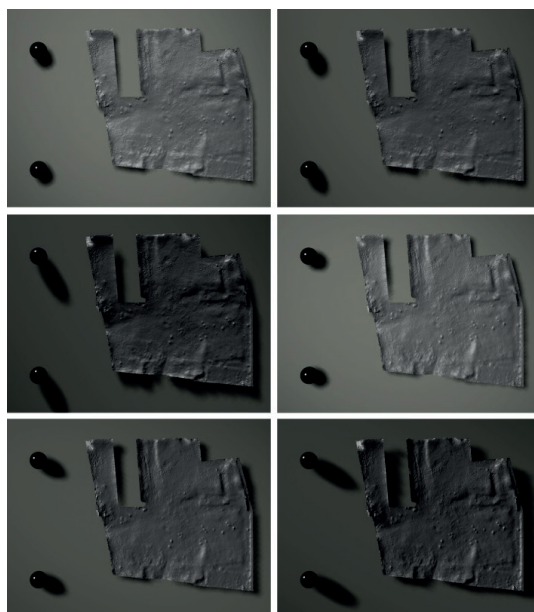


Figura 8. Colección de imágenes obtenidas desde la aplicación informática de modelado 3DMax.

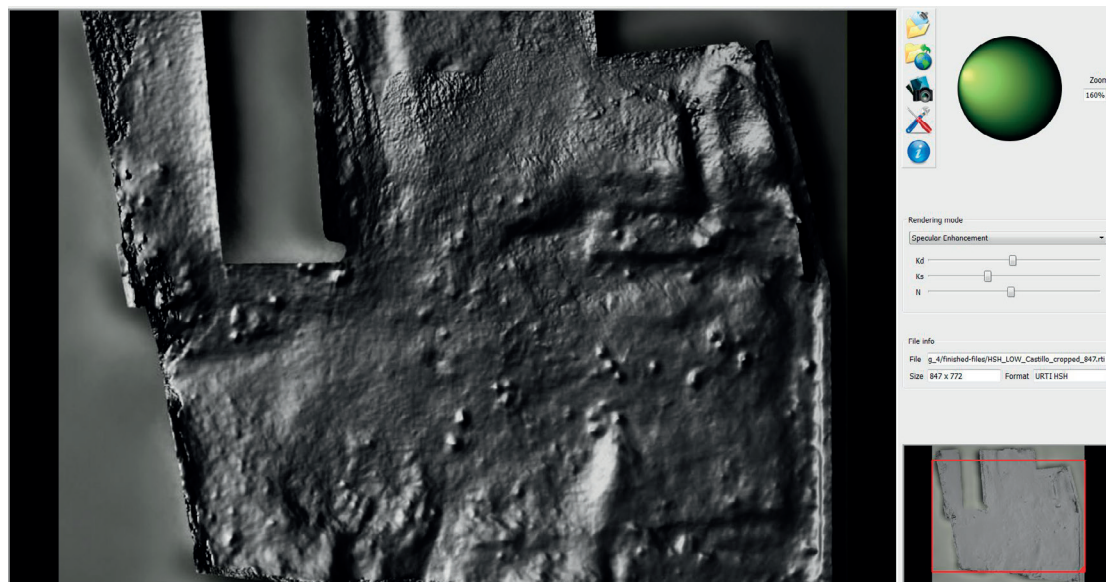


Figura 9. Mapa 2.5D renderizado con el método *Mejoramiento Especular*.

estudio fue eliminada la información de color, por lo que los modos de renderizados aplicados solo actúan sobre la relación entre las normales y las condiciones de luz. En el análisis de la topografía interior del castillo de Villagarcía de Campos, se aplicaron los siguientes métodos propuestos por Malzbender y Gelb (2001) y CHI (2010):

- “Ganancia Difusa (*Diffuse Gain*)”: Enfatiza la representación en los cambios bruscos de altura y profundidad. En las áreas que presentan una secuencia rápida y densa de cambios de direcciones de normales, la función profundiza la depresión mediante el aumento de la tasa de cambio de dirección (la curvatura gaussiana de la parábola, o sea, la segunda derivada) de la pendiente de la superficie como demuestra Malzbender *et al.* (2001). El modo, según señalan los autores, puede tener efectos secundarios de la introducción de color falso en algunas imágenes, aunque en nuestro caso no interesa por prescindir de la información RGB.
- “Mejoramiento Especular (*Specular Enhancement*)”: Permite modificar las propiedades de la superficie (basadas en la especularidad) y la luz simulada, separando las propiedades de color, la reflexión especular de la superficie y el tamaño del reflejo especular. Se logra de esta manera una interpretación particularizada en

las diferentes texturas (materiales) que componen la escena.

4.1. Resultados en el caso de estudio

Para el caso del Castillo de Villagarcía de Campos, la insuficiente documentación histórica y sus características topográficas de “planicie” hicieron propicia la aplicación del nuevo flujo de RTI para la interpretación superficial del yacimiento.

El resultado del proceso nos brinda, como producto final, un mapa interactivo de variaciones de reflectancia, intensidades y direcciones de la iluminación, que permiten una lectura de la topografía del terreno con mayor acento en su tridimensionalidad. La evaluación visual a partir de la variación de los estímulos luminosos y los diferentes modos de renderizado han permitido dilucidar y detallar los siguientes rasgos del inmueble (representados visualmente en las figuras 9 y 10):

1. Posición de las bocas de los dos aljibes que daban cuenta los estudios históricos.
2. Trazas de las cimentaciones de muros internos (Patio Residencial).
3. Límites de la segunda crujía de la Fachada Norte (Patio de Armas).

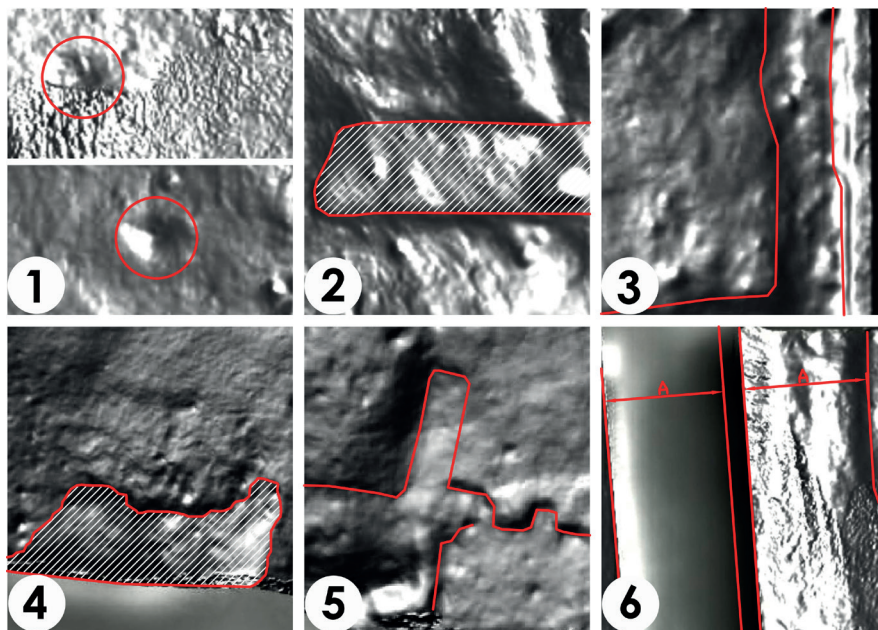


Figura 10. Interpretación visual de los rasgos topográficos de la ruina del Castillo de Villagarcía de Campos.

4. Acumulaciones sedimentarias a causa de la degradación de los muros de adobe.
5. Recorrido de trazas de posibles muros, previsiblemente de origen posterior al uso del inmueble en su función de Castillo (Fachada Este).
6. Recorrido de trazas de posible dependencia contigua a la panera de trigo y de igual dimensión (no documentadas en estudios históricos).

5. Conclusiones y trabajo a futuro

La creciente necesidad de conservación de los recursos patrimoniales obliga a una constante evolución de las técnicas de su estudio. En particular el análisis e interpretación de superficies se presenta como uno de los más urgentes requerimientos del estudio y conservación del patrimonio arqueológico a escalas arquitectónica y urbana.

El método de análisis planteado, parte del uso de técnicas de documentación fotogramétrica basada en imágenes: *Shape from Stereo* y *Structure from Motion* hasta la creación de mapas 2.5D de la topografía de superficies mediante RTI (basado en el método *Shape from Shading*), minimizando la dependencia a los dispositivos

físicos (electromecánicos), y haciendo un uso eficiente de las posibilidades de la cultura digital. La generación de mapas interactivos que utilizan propiedades hasta ahora poco exploradas en el campo de la arqueología de la arquitectura, como la reflectancia de los materiales y las condiciones de iluminación, plantean una solución eficiente, especialmente en la interpretación y evaluación de superficies caracterizadas por imperceptibles variaciones de profundidad (llanas). Ello hace posible, como se ha demostrado en el caso de estudio, la solución a interrogantes de índole histórico-técnico.

El nuevo flujo de trabajo descrito en el presente texto para la obtención de imágenes IRT, permite superar las desventajas de las, hasta ahora, aproximaciones típicas en la generación de este tipo de imágenes. Por una parte la transformación de la escena real en una malla tridimensional digital generada desde posiciones terrestres y aéreas, permite independizar el resultado del tamaño del escenario y las distancias al objetivo. Por otra parte la generación de imágenes desde un entorno virtual (laboratorio virtual), permite manipular los parámetros de luces y cámaras sin que ello represente un coste adicional de tiempo o económico.

La reciente implementación de RTI virtuales en el ámbito patrimonial, hace previsible que en el futuro a corto plazo continúe el desarrollo de los algoritmos y métodos del trabajo asociados. El caso particular expuesto abre inmediatas líneas de investigación, como son: (a) la evaluación de los diferentes modos de renderizado y su relación con las texturas y colores RGB típicos en escenarios arquitectónicos-urbanos: piedra caliza, pizarra, vegetación, entre otros, y (b) la valoración cuantitativa de la ganancia del cálculo de posiciones de luz frente a la detección automática de su dirección, para conseguir un aumento de la eficiencia del procesado y una mayor precisión en los procesos de interpretación.

Agradecimientos

Profesores del grupo de investigación del Laboratorio de Fotogrametría Arquitectónica de la Universidad de Valladolid, con especial atención a los doctores Juan José Fernández, Jesús San José y José Martínez. El trabajo ha sido financiado por la Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León, España, y el Fondo Social de la Unión Europea.

Referencias

CHI (Cultural Heritage Imaging), 2010. *Guía de visualizadores RTI, Cultural Heritage Imaging and Visual Computing Lab*. Italia: ISTI - Italian National Research Council.

Debevec, P., Hawkins, T., Tchou, C., Duiker, H.P., Sarokin, W., Sagar, M. 2000. Acquiring the Reflectance Field of a Human Face, *Proceedings of the 27th annual conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH'00* y Association for computing machinery, New Orleans, EEUU, 25-27 Julio, 145-156. <http://dx.doi.org/10.1145/344779.344855>

Duffy, S., Byran, P., Earl, G., Beale, G., Pagi, H., Kotoula, E. 2013. *Multi-light imaging for heritage applications*. United Kingdom: English Heritage.

Earl, G., Basford, P.J., Bischoff, A.S., Bowman, A., Crowther, C., Dahl, J., Hodgson, M., Martínez, K., Isaksen, L., Pagi, H., Piquette, K.E., Kotoula, E. 2011. Reflectance transformation imaging systems for ancient documentary artefacts, *Proceedings of the international conference on Electronic Visualisation and the Arts*, British Computer Society Swinton, Londres, United Kingdom, 6-8 Julio, 147-154.

Fernández-Martín, J.J., San José-Alonso, J., Martínez-Rubio, J., Finat-Codes, J., Cobos, F. 2006. Evolución de los sistemas de documentación para el estudio de castillos. *Proceedings of the international Workshop Aspetti dell'Incastellamento Europeo e Mediterraneo*, Università degli studi di Firenze, Arezzo, Italia, 10-14 Junio, 127-131.

García-Fernández, J., 2014. *La cultural digital para la puesta en valor del patrimonio arquitectónico* (tesis doctoral). Universidad de Valladolid, España.

Georghiadis A., Belhumeur P.N., Kriegman D. 1999. Illumination-Based Image Synthesis: Creating Novel Images of Human Faces Under Differing Pose and Lighting. *Proceeding of the IEEE Workshop on Multi-View Modeling and Analysis of Visual Scenes*, Colorado, EEUU, 21-23 Junio, 47-54. <http://dx.doi.org/10.1109/MVIEW.1999.781082>

Ikeuchi, K., Horn, B. 1981. Numerical shape from shading and occluding boundaries. *Artificial Intelligence*, 17(3), 141-184. [http://dx.doi.org/10.1016/0004-3702\(81\)90023-0](http://dx.doi.org/10.1016/0004-3702(81)90023-0)

Kersten, D. 2010. *Computational vision, shape from X*. Minnesota: University of Minnesota.

Kimmel, R., Sethian, J. 2002. Optimal algorithm for shape from shading and path planning. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 14(3), 237-244. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1011234012449>

Malzbender, T., Gelb, D., Wolters, H. 2001. *Polynomial Texture Map (.ptm) File Format*. EEUU, Palo Alto: Hewlett-Packard Laboratories.

Malzbender, T., Gelb, D. 2001. Polynomial texture maps. *Proceedings of the 28th annual conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH'01* y Association for computing machinery, Los Angeles, EEUU, 12-17 Agosto, 519-528. <http://dx.doi.org/10.1145/383259.383320>

Mudge, M., Malzbender, T., Chalmers, A., Scopigno, R., Davis, J., Wang, O., Gunawardane, P., Ashley, M., Doerr, M., Proenca, A., Barbosa, J. 2008. Image-Based Empirical Information Acquisition, Scientific Reliability, and Long-Term Digital Preservation for the Natural Sciences and Cultural Heritage, en *EUROGRAPHICS 2008 Tutorial*. Greece: The Eurographics Association.

Piquette, K. 2011. Reflectance transformation imaging and ancient Egyptian material culture. *Damqatum: The CEHAO newsletter*, 7(1), 16-20.

Prados, E., Faugeras, O. 2003. Perspective Shape from Shading" and Viscosity Solutions. *Proceedings of the Ninth IEEE International Conference on Computer Vision*. Nice, Francia 13-19 Octubre, 826-831. <http://dx.doi.org/10.1109/ICCV.2003.1238433>

- Prados, E., Faugeras, O. 2006. *Shape from Shading*, en *Handbook of Mathematical Models in Computer Vision*. EEUU: Springer, 375-388.
- Van Overveld, C. 1992. Beyond bump maps: nonlinear mappings for the modeling of geometric details in computer graphics. *Computer-Aided Design*, 24(4), 201-209. [http://dx.doi.org/10.1016/0010-4485\(92\)90056-G](http://dx.doi.org/10.1016/0010-4485(92)90056-G)
- Wahbeh, W. 2011. *Architectural Digital Photogrammetry: Panoramic Image-Based Interactive Modelling*, (tesis doctoral). Università degli Studi di Roma “La Sapienza”, Italia.
- Weinshall, D. 1994. Local Shape Approximation from Shading. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 4(2), 119-138. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01249892>
- YDC2 (Imaging Lab). 2014. *Imaging Forum for Cultural Heritage Collections*. EEUU: University of Yale.