

Simulación de imágenes sintéticas mediante software libre (Blender)

Sinthetic image simulation using free software (Blender)

Carlos Alberto Stelle, Francisco Javier Ariza López, Manuel Antonio Ureña Cámara

REVISTA **MAPPING**
Vol. 27, 191, 22-29
septiembre-octubre 2018
ISSN: 1131-9100

Resumen

Las imágenes de satélite son los productos principales y más relevantes de la Teledetección debido a sus numerosas aplicaciones en las más diversas áreas de conocimiento. La simulación de estos productos tiene interés tanto en las etapas de diseño de futuros sensores como en sus aplicaciones. Uno de los desafíos de la simulación de imágenes es reducir al máximo la brecha entre el resultado «sintético» y la realidad de la escena que uno desea capturar. En este contexto, el propósito de este trabajo es doble, por un lado, ofrecer una breve revisión de los métodos de simulación de imágenes de sensores pasivos, presentando una propuesta para clasificarlos, y presentar el modelo conceptual del sistema de simulación de imágenes de satélite que se está desarrollando, destacando los aspectos que proporcionan versatilidad y funcionalidad, así como algunos resultados iniciales.

Abstract

Satellite images are the main and most relevant products of Remote Sensing due to its numerous applications in the most diverse areas of knowledge. The simulation of these products is of interest both in the design stages of future sensors and in their applications. One of the challenges of image simulation is to minimize the gap between the “synthetic” result and the reality of the scene you want to capture. In this context, the purpose of this work is twofold, on the one hand, to offer a brief review of the methods of simulation of images of passive sensors, presenting a proposal to classify them, and present the conceptual model of the satellite image simulation system that is being developed, highlighting the aspects that provide versatility and functionality, as well as some initial results.

Palabras clave: imágenes sintéticas, Teledetección, simulación, Blender, sensores, satélite.

Keywords: synthetic image, Remote Sensing, simulation, Blender, sensors, satellite.

Directoria de Servicio Geográfico, Ejército de Tierra de Brasil
cstelled@gmail.com
Escuela Politécnica Superior de Jaén, Universidad de Jaén
fjariza@ujaen.es
Escuela Politécnica Superior de Jaén, Universidad de Jaén
maurena@ujaen.es

Recepción 07/09/2018
Aprobación 25/09/2018

1. INTRODUCCIÓN

Las imágenes de satélite son los productos principales y más relevantes de la Teledetección (o *Remote Sensing*, RS) ya que permiten adquirir información sobre la superficie de la Tierra en amplias zonas, y de manera periódica. La Teledetección capta la energía reflejada o emitida sin necesidad de contacto físico entre el sensor del sistema y el objeto o área detectada. Debido a sus numerosas aplicaciones (p.ej. agricultura, detección de cambios, cambio climático, estimación de masas de agua, etc.) en las más diversas áreas de conocimiento la Teledetección es la base de los sistemas de observación de la Tierra y la principal fuente de *Bigdata* ambientales (Jensen y Kulla, 2018).

La simulación de imágenes procedentes de sensores pasivos (p.ej. LandSat, SPOT, etc.) tiene interés tanto en las etapas de diseño de futuros sensores (p.ej. estudios de comportamiento espacial, temporal, radiométrico, espectral, etc.), como en sus aplicaciones (p.ej. posibilidades estereográficas, etc.). Todo ello ofrece a los desarrolladores de sistemas, sensores, algoritmos, aplicaciones, etc., un sustituto de campañas de campo potencialmente inalcanzables. Con este fin, la NASA, a través del Instituto de Tecnología de Rochester, ha desarrollado el programa *Digital Imaging and Remote Sensing Image Generation* (DIRSIG) para construir un modelo de base física para la generación de imágenes sintéticas, que permita producir, de extremo a extremo, simulaciones de imágenes que incorporen todas las características relevantes de las imágenes (Schott et al., 2012).

Una forma eficiente de producir una imagen sintética, o simulada, es crear un entorno en el que se reproduzcan las condiciones de generación de los datos. Lentilucci y Brown (2003) enfatizan que, idealmente, el modelo base para la simulación de imágenes de cierta complejidad espacial y espectral, debe coincidir con el mundo real para que el usuario tenga fe en el desempeño del sistema de simulación. Por tanto, el principal desafío de la simulación de imágenes es reducir al máximo la brecha entre lo «sintético» y lo «real», entre el producto de laboratorio procedente de modelos físicos y la realidad de una toma bajo condiciones muy específicas.

Las imágenes sintéticas (SI) se pueden definir como aquellas creadas mediante el uso de recursos computacionales o realidad virtual (VR), con herramientas de software o por métodos de modelado específicos, tal que permiten explorar y sugerir diferentes situaciones de visualización, inmersión e interacciones y que facilitan trabajos complejos de aprendizaje a través de la creación de un entorno parametrizable en el que se reproducen las condiciones de captura (Stelle et al., 2018). La evolución de los recursos computacionales, *hardware* y *software*, ha permitido notables avances en la visualización y manipulación de cantidades ingentes de datos como las que se generan en cada imagen de saté-

lite, por lo que también se ha facilitado la creación sintética de imágenes y con ello se puede respaldar los estudios de diseño, implantación y operación de sensores y plataformas satelitales (Schott et al., 2010).

En comparación con otras áreas de la Teledetección, son escasos los trabajos publicados sobre simulación de imágenes y, además, suelen centrarse en aplicaciones muy específicas. Por ejemplo, Alarcon y Sassenrath (2004) y Sassenrath et al. (2003), presentan un entorno de simulación basado en la web para generar imágenes sintéticas hiper-espectrales de parcelas de algodón. Otra aplicación se puede ver en Marcal et al. (2010), que proponen un marco (*Synthetic Image Testing Framework*) como herramienta para evaluar y comparar los resultados de segmentación de imágenes.

El objetivo de este trabajo es doble, por un lado, ofrecer una aproximación conceptual a los procesos de generación de imágenes sintéticas y, por otro, presentar cómo los autores están abordando la concepción y desarrollo de la herramienta «Simulación de Imagen Sintética (SIoS)» a partir de software libre, lo cual ofrecerá un acceso mucho más universal a este tipo sofisticado de herramientas. A partir de aquí, el documento se organiza en dos secciones adicionales que tratan los dos aspectos indicados. Finalmente, se incluyen unas conclusiones generales centradas en aspectos metodológicos y del desarrollo futuro de la herramienta SIoS.

2. MÉTODOS DE SIMULACIÓN DE IMÁGENES

Teniendo en cuenta que las imágenes de satélite se generan según cuatro resoluciones (espacial, temporal, radiométrica y espectral), y que simular es tratar de reproducir un sistema o resultado bajo condiciones controladas, es razonable considerar que los esfuerzos de la simulación deben dirigirse, de una manera genérica, a cada uno de estos aspectos. En relación al aspecto espacial, en algunas aplicaciones sencillas sólo será necesario cambiar el tamaño de píxel de la imagen. La simulación del aspecto temporal se puede obtener a partir de las efemérides de una plataforma-sensor y, de esta manera, usar un modelo para estimar los datos en un momento deseado. Simular datos con una menor cantidad de bits también es relativamente fácil, ya que es suficiente comprimir el rango de niveles digitales, si bien el proceso inverso ya no es tan trivial. Habitualmente, el aumento de bits en la cuantificación una vez que una imagen ha sido capturada se logra mediante la adición de ruido. En relación a la componente espectral, de manera genérica se pueden colapsar ventanas (p.ej. paso de hiper-espectral a multiespectral) e incluso interpolar valores de esas ventanas (p.ej. paso de multi-espectral a hiper-espectral). Sin

Tabla 1. Clasificación de métodos de simulación de imágenes

Clasificación		Ejemplos
De base Analógica	Dioramas/maquetas	Francis et al. (1993)
Híbridos	Diorama + computador	Maver y Scarff (1993)
De base Computacional	Basados en imágenes existentes	Justice et al. (1989) Esposito et al. (1998) Boggione et al. (2003) Chen et al. (2008) Yang et al. (2009) Nelson et al. (2009) Maeda et al. (2008)
	Totalmente sintéticas	lentilucci and Brown (2003) Schott (1997) Latorre et al. (2002)

embargo, materializar un sistema simulador es costoso y por ello tampoco conviene olvidar la adecuación al uso, así, los métodos de simulación deben ajustarse a cada problema y conviene conocerlos por medio de una breve revisión

Aunque hay muchos métodos posibles para la simulación de imágenes, no ha habido un trabajo que los estructure. Este es uno de los principales objetivos de este trabajo y para ello se propone la estructura que se muestra en la Tabla 1.

2.1. De base analógica

Los métodos de base analógica son aquellos que requieren de un soporte físico, real, sobre el que se realizan las capturas de manera controlada. Este soporte puede ser el mundo real que sea de interés, si sus dimensiones son asequibles a los experimentos que se requieren realizar; en otros casos se utilizan maquetas o dioramas a escala.

Estos modelos pueden incluir el terreno, la cobertura del suelo, las estructuras (p.ej. carreteras, ferrocarriles, construcciones, etc.), los vehículos, etc., todos ellos con un nivel de detalle que dependerá de la escena de interés y de la resolución del sensor que se va a simular. Este enfoque ha sido descrito por Francis y col. (1993) y García-Pérez y col. (2008). La escena se ilumina con un haz colimado para simular el Sol y muchas fuentes difusas para simular el cielo, como se muestra en la Figura 1. Los sensores se sitúan adecuadamente a cierta distancia del modelo y la óptica se ajusta para simular el campo de visión deseado. Este caso, la imagen está diseñada para captar el campo de radiancia en el sensor. También es fácil cambiar la cámara y los ángulos del Sol para generar múltiples imágenes de la misma escena. Esta metodología tiene la desventaja de que es necesario garantizar que se incluyan altas reflectancias y sus variaciones en este escenario.

2.2 Híbridos

El problema mencionado anteriormente es más grave cuando este método se usa para simular escenas multi-espectrales. Maver y Scarff (1993) describen un método híbrido para simular escenas multispectrales donde los modelos físicos y la iluminación se utilizan para generar escenarios que luego se procesan a través de la visión por computadora.

La ventaja de este enfoque es que algunas de las variaciones espaciales y las interacciones de ciertos materiales se pueden incluir en el diseño del modelo. La desventaja es que la generación de escenas complejas puede ser difícil, requiriendo en muchos casos una considerable edición manual y trabajo de taller.

2.3 De base computacional

Este enfoque implica técnicas de simulación que proponen métodos en los que las imágenes simuladas se generan a partir de otras imágenes ya existentes, o bien a partir de una escena sintética. Estas técnicas abordan generalmente la degradación de una imagen de mejor resolución para



Figura 1. Simulación usando el modelo físico (Schott, 1997)

generar imágenes con resoluciones peores, aunque hay casos inversos. Estas técnicas permiten simular escenas cercanas a la realidad.

2.3.1 Basado en imágenes existentes

Se trata de un método cuya entrada principal son una imagen(es) ya existente(s) que se somete(n) a transformación(es) o modelización(es) para obtener la imagen simulada en la que cambia una o alguna de sus resoluciones o aspectos relacionados con ellas. Se puede aplicar tanto para simular nuevos productos (p.ej. imágenes de un nuevo sensor), como para analizar ciertos comportamientos de la Teledetección en aplicaciones concretas, etc.

En relación a la resolución espacial, su degradación fue uno de los primeros ámbitos de estudio. En esta línea Justice et al. (1989) generan imágenes simuladas en seis resoluciones diferentes en un rango de 79 m a 4 000 m a partir de datos del sensor Multiespectral Scanner/Landsat (MSS). Algo parecido realizan más recientemente Nelson y col. (2009) quienes estudiaron los efectos de la resolución espacial en la estimación de áreas forestales, para ello utilizaron imágenes simuladas de 90 a 990 m de resolución a partir de imágenes de 30 m del sistema Landsat. Por su parte, Maeda y col. (2008) remuestran por el vecino más próximo imágenes ETM+/Landsat7 para simular y evaluar el potencial de las imágenes WFI/CBERS-3 en aplicaciones de usos y coberturas en regiones con características paisajísticas distintas.

Las resoluciones espectral y radiométrica, también han recibido una atención amplia por parte de los investigadores. Esposito y col. (1998) presentan una simulación de imágenes de las cámaras CBERS, que en el momento de este trabajo aún no estaban operativas, utilizando imágenes AVIRIS (*Airborne Visual Imaging Infrared Spectrometer*). Fue necesario extrapolar el comportamiento espectral medido por AVIRIS, a 20 km de altitud, a la altitud de CBERS, que orbita a 778 km. Para este cálculo se utilizó el programa MODTRAN 3 (*Moderate resolution atmospheric TRANsmision*) (<http://modtran.spectral.com/>), que proporciona valores de transmitancia en cada longitud de onda. Además, dada la diferencia de tiempo de toma entre las imágenes (CBERS está programado para pasar sobre el ecuador a las 10:30 a.m., y las imágenes de AVIRIS del estudio se recolectaron entre la 1:30 p.m. y las 4:30 p.m.), y conociendo las condiciones de iluminación de la escena y el ángulo del cenit solar, se calculó el comportamiento espectral tanto para el momento de tránsito de AVIRIS como para el momento de tránsito del CBERS, obteniendo un factor de corrección que se aplicó en toda la escena. También puede ser de interés el simular nuevas bandas, así Boggione y col. (2003) presentan la simulación una banda pancromática para Landsat 5 a partir de sus bandas multi-espectrales. En este trabajo, se utilizan técnicas de restauración combinada e interpolación para generar imágenes con una

mayor resolución espacial. La cuestión espectral se resuelve utilizando la relación entre las áreas de las curvas espectrales de las bandas de Landsat 7 y su canal pancromático.

El infrarrojo medio es una longitud de onda altamente dependiente de la dispersión atmosférica y las emisiones, por lo que tiene una mayor complejidad que otras bandas. Yang y col. (2009) presentan un sistema de simulación de imágenes de alta resolución (10 m) en el infrarrojo medio utilizando un modelo analítico de transferencia radiativa de la atmósfera.

También hay trabajos sobre imágenes hiper-espectrales, así Chen y col. (2008) proponen un método de generación de imágenes hiper-espectrales utilizando imágenes espectrales de baja resolución. El método propuesto utiliza la idea de mezcla de píxeles para comprender la relación entre los valores espectrales de un píxel de la imagen y simular los procesos de transmisión de la radiación.

2.3.2 Totalmente Sintéticas

Schott (1997) propone que para la creación de imágenes totalmente sintéticas se supone que todos los elementos que intervienen (p.ej. sol, atmósfera, plataforma, sensor, elementos de superficie de la Tierra, etc.) se simulan utilizando modelos computacionales. Este enfoque permite infinitas variaciones en todas sus partes, por ejemplo, permite cambiar sensores entre plataformas, definir nuevos sensores, establecer condiciones de toma concretas (fecha, hora, atmósfera, etc.). Para ello se requiere de una herramienta de software potente en su capacidad de cálculo y versátil en su parametrización. La complejidad computacional y de codificación, así como los tiempos de ejecución son desventajas iniciales, pero superadas por las capacidades de cálculo actuales de los sistemas informáticos.

En la práctica, la idea es modelar con precisión todos los procesos físicos que ocurren en el proceso de formación de imágenes satelitales, si bien también se puede aplicar a imágenes de fotogrametría. El resultado es un sistema de modelos (geometría de la toma, sensor, atmósfera, etc.), todos ellos de alta fidelidad respecto a la realidad, tal que proporcionar una capacidad total de control sobre el proceso de creación de imágenes simuladas.

La posición de la toma de una imagen se puede modelar adecuadamente mediante las ecuaciones del desplazamiento de la plataforma, o por medio de las efemérides que suelen estar disponibles. Los sensores existentes se modelizan mediante las ecuaciones de respuesta de sus transductores, curvas de calibración y ópticas. La Tierra puede ser aproximada por esferoides, elipsoides y geoides, o por modelos de superficie del terreno, sobre los que se situarán los objetos de interés en la toma. De esta forma, la posición de la plataforma para la toma, las propiedades del sensor (p.ej. tipo, campo de visión), junto a la geometría de la Tierra

y la posición del Sol establecen un sistema de base física muy bien conocido.

Mayor problema presenta el aspecto radiativo para generar una estimación de la radiación que llega al objetivo del sensor. Este modelo a menudo se asocia con un modelo de propagación de la radiación. Uno de los más extendidos es el modelo MODTRAN (*MODerate resolution atmospheric TRANsmision*), utilizado para calcular el nivel de radiación superficial en las longitudes de ondas de las microondas, del infrarrojo cercano, del visible y del ultravioleta (Latorre, 2002). Este modelo puede utilizarse para predecir la radiación espectral sobre geometrías diversas y bajo condiciones atmosféricas distintas. Los modelos de propagación atmosférica a menudo se vinculan a una base de datos con parámetros de condiciones atmosféricas que se requieren como insumo.

Otro aspecto crítico de la creación de imágenes sintéticas es la simulación de la toma de la escena real. Aquí se requieren técnicas de trazado de rayos (*raytracing*) y radiosidad avanzadas para generar un resultado realista y verosímil. Estos sistemas son capaces de barrer la escena virtual con rayos y generar una imagen realista que tiene en cuenta las fuentes de iluminación directa, indirecta, difusas, efectos atmosféricos, etc. Estos sistemas están bastante difundidos en el campo de los video juegos y de las aplicaciones en la ingeniería (p.ej. visualizaciones realistas) así como de la realidad virtual y aumentada, pero todavía no se han difundido dentro del campo de la investigación en Teledetección.

El sistema DIRSIG es el único del que tenemos noticias, si bien se trata de una herramienta de difusión controlada. Lentilucci y Brown (2003) utilizaron DIRSIG y concluyeron que los datos sintéticos deberían considerarse una herramienta poderosa para la prueba de algoritmos y como un sustituto de datos reales cuando no están disponibles.

3. SIMS: SIMULADOR DE IMÁGENES SINTÉTICAS DE TELEDETECCIÓN BASADO EN BLENDER

En la actualidad estamos desarrollando el sistema SimS, un simulador de base computacional de imágenes totalmente sintéticas de teledetección pasiva. Con la idea de abrir a la comunidad científica los resultados de este trabajo, la principal decisión estratégica para el desarrollo de esta herramienta de simulación fue la elección de la herramienta Blender 2.78 (<https://www.blender.org/>) como

herramienta anfitriona para su desarrollo por sus características:

- Código abierto. Blender es una herramienta de código abierto y gratuito, con una potente comunidad de usuarios.
- Capacidades de Blender. Tiene capacidades plenas para la producción de modelos 3D realistas: modelado, trazo de rayos, manipulación, animación, simulación, renderizado, composición y seguimiento de movimiento, incluso edición de video y creación de juegos.
- Personalizable. Permite la personalización de la interfaz y de numerosos parámetros.
- Programable. Se puede extender con programación en Python. Blender tiene una interfaz y un diseño flexibles controlados por Python y es posible crearlas usando la API de Python accesible de Blender. De esta forma también se puede acceder a la librería OpenCV (<https://opencv.org/>) que extiende las capacidades de programación avanzadas sobre imágenes.
- Interoperable con datos espaciales. La biblioteca de abstracción de datos geoespaciales (GDAL) para el manejo de formatos de datos geoespaciales puede integrarse en el sistema por medio de Python.

A partir de esta decisión, Blender actúa como marco anfitrión de un sistema de modelos programados en Python y que tiene que ser capaz de manejar todos los aspectos presentados en el apartado dedicado a la simulación de imágenes totalmente sintéticas. El diseño conceptual de los módulos (modelos) principales son los que se pueden ver en la Figura 2.

A continuación se describen las capacidades y estado actual de los trabajos:

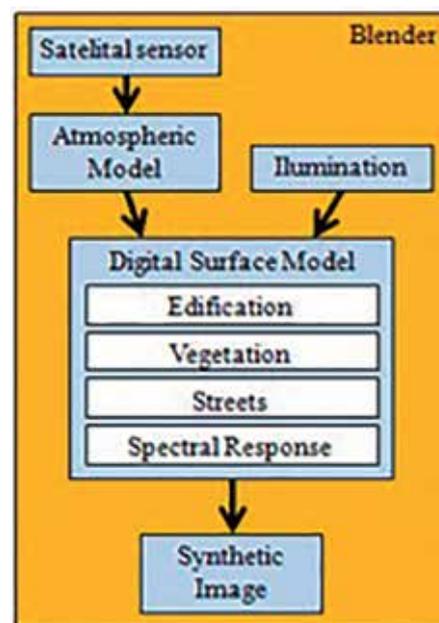


Figura 2. Diseño conceptual

- Sensor. Se puede elegir el sensor de una biblioteca de sensores. Además, se pueden elegir las bandas con las que se quiere trabajar.
- Plataforma. Existe una biblioteca de plataformas de satélite. Su posición espacial se obtiene a partir de sus propios parámetros orbitales o de efemérides. Es posible definir nuevas plataformas.
- Modelo atmosférico. Está pendiente de desarrollo. Tendrá como objetivo únicamente predecir de forma simple el estado dinámico de la atmósfera. Este modelo simple se definirá solo para fines creación de imágenes sintéticas. Se ofrecerá un conjunto de modelo parametrizables o en forma de biblioteca.
- Iluminación. Se puede elegir la fecha y hora de toma, y con ello la posición del Sol. A partir de ahí, mediante el sistema de trazados de rayos de Blender, se simula el comportamiento de los rayos solares incidentes.
- Escena. La escena geográfica se determina por sus coordenadas geográficas (latitud y longitud). Su contenido cartográfico incluye el modelo de elevaciones del terreno, cubiertas vegetales, edificaciones y vías de comunicación, todavía sin hidrografía. Estos elementos se pueden generar aleatoriamente o ser importados a partir de una cartografía existente. En el primer caso el usuario introduce sus preferencias sobre los diferentes diseños de calles, construcciones, densidades de objetos, etc. Para la creación de calles se usan plantillas que pueden ser modificadas por el usuario. Para las edificaciones, se utilizan semillas de objetos GML del proyecto Rando-CityGML3D con nivel de detalle LOD 2.xxx. El sistema de importación de cartografía vectorial para crear la imagen está en desarrollo.
- Respuestas espectrales. Este módulo permite simular texturas estáticas (p.ej. asfalto, hormigón, coníferas, aluminio, etc.), que se vinculan a los objetos de la escena. Las respuestas están definidas a partir de la biblioteca espectral ASTER (Baldrige et al., 2009).
- Imagen sintética. Se generan imágenes sintéticas en diversos formatos (p.ej. TIFF, JPG, etc.) que posteriormente pueden ser cargadas en sistemas de tratamiento de imágenes (p.ej. ENVI, ERDAS, etc.). En un futuro se asociará un archivo con los metadatos detallados descriptivos del proceso de síntesis de cada imagen.

A continuación se ofrecen algunas capturas de pantalla que muestran el grado de parametrización que permite SImS, así como algunas imágenes sintéticas ya generadas.

Las Figuras 4 y 5 muestran, respectivamente, un escenario simulado en su aspecto real dadas las condiciones geográficas y de iluminación predefinidas, y el sensor muestra en posición nadir (vista superior). Los parámetros definidos de la siguiente manera:

- Latitud: 37.78°
- Longitud: 3.78°
- Día: 25
- Mes: agosto
- Año: 2017
- Hora: 10:00
- UTC: 2

Finalmente, para mostrar la versatilidad y potencialidad del simulador, la Figura 6 muestra la misma imagen que corresponde al sensor OLI, Landsat 8, Banda 5 Near-Infrared (0.85 - 0.88 μm), pero con una resolución espacial de aproximadamente 1 m y no 30 m.



Figura 3.
barra de herramientas del simulador

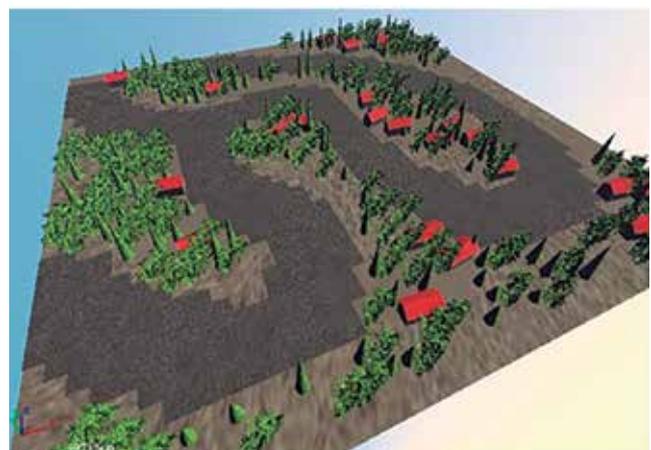


Figura 4. Escenario simulado (apariencia real)



Figura 5. Escenario simulado (apariencia real y vista superior)



Figura 6. Escenario simulado (vista superior)

3. CONCLUSIONES

La creación de imágenes sintéticas es de gran interés para la investigación, desarrollo de nuevos proyectos de sensores y plataformas y también para las aplicaciones. La simulación puede afectar a todas las resoluciones de una imagen (espacial, temporal, radiométrica y espectral), y se basa en un sistema de modelos de base física bien definidos. La creación de imágenes totalmente sintéticas es la forma más versátil y potente para afrontar este reto;

sin embargo, no existen herramientas de simulación de amplia difusión.

En este artículo se han descrito las características principales de SImS, una herramienta de software que está actualmente en desarrollo y que permite crear imágenes sintéticas a partir de la simulación de un escenario 3D dentro de la herramienta de código abierto Blender. SImS permite al usuario generar una escena en la que controla todas las etapas propias de un sistema real. Actualmente, el usuario puede definir sensor, bandas, resolución espacial, día, mes, año, hora, latitud, longitud, y probabilidades o cantidades específicas de presencia de objetos tipo calles y edificaciones y vegetación, para la creación aleatoria de un escenario virtual que se convierte en imagen exportable. Esta flexibilidad es fundamental para que el SImS sea una herramienta universal.

El trabajo en el futuro inmediato consistirá en integrar diferentes modelos atmosféricos con diferentes parámetros meteorológicos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Junta de Andalucía la financiación del Grupo de Investigación en Ingeniería Cartográfica (PAIDI-TEP-164), así como al Departamento de Ciencia y Tecnología del Ejército de Tierra de Brasil.

REFERENCIAS

- Alarcon, V.J. and Sassenrath, G.F. (2004). *Cotton crop spectral imaging analysis: a web-based hyperspectral synthetic imagery simulation system*. In: *Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability*, (Gao, W. and Shaw, D.R., Eds.). Proceedings of SPIE, Vol. 5544, 178-185.
- Baldrige, A.M., S.J. Hook, C.I. Grove and G. Rivera. (2009). *The ASTER Spectral Library Version 2.0*. *Remote Sensing of Environment*, vol 113, pp. 711-715.
- Boggione, G.A.; Pires, E.G; Santos, P.A; Fonseca, L.M.G. (2003). *Simulation of Panchromatic band by spectral combination of multispectral ETM+ bands*. *International Symposium on Remote Sensing of Environment (ISRSE)*, Hawaii, Nov. 2003.
- Chen, F.; Niu, Z.; Sun, G.; Wang, C.; Tang, J. (2008). *Using low-spectral-resolution images to acquire simulated hyperspectral images*. *International Journal of Remote Sensing*, v. 29, p. 2963-2980.
- Esposito, E.S.C. (1998). *Simulação das bandas espectrais das câmaras CCD e WFI do satélite CBERS, a partir de dados do sensor hiperespectral AVIRIS*. versão: 1970-01-01.

- Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- Francis, I; Maver, L.; Schott, J.R. (1993). *Comparison of physically and computer generated imagery*. Proceedings SPIE, v. 1904, p. 20-23.
- Perez-Garcia, J.L.; Delgado, J.; Cardenal, J.; Ureña, M.A. (2008). *On the use of low-cost synthetic models for educational research purposes in digital photogrammetry*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B6a. Beijing.
- lentilucci, E.J.; Brown, S.D. (2003). *Advances in Wide Area Hyperspectral Image Simulation*. Proceedings of SPIE Vol. 5075.
- John R. Jensen & Dr. Kalmesh Lulla (2008) *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective*, Geocarto International, 2:1, 65, DOI: 10.1080/10106048709354084
- Justice, C.O.; Markhan, B.L.; Townshend, J.R.G.; Kennard, R.L. (1989). *Spatial degradation of satellite data*. *International Journal of Remote Sensing*, v. 10, n. 9, p. 1539-1561.
- Latorre, M.; Abílio, O.; Júnior, R. D.C.; Paula, A.; Carvalho, F.D.; Shimabukuro, Y.E. (2002). *Correção Atmosférica: Conceitos e Fundamentos*. *Espaço & Geografia*, v.5, n. 1, p. 153-178.
- Maeda, E.E.; Arcoverde, G.F.B.; Formaggio, A.R.; Shimabukuro, Y.E. (2008). *Evaluation of the potentiality of WFI/CBERS-3 Sensor data for land use and land cover classification*. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 1, n. 60, p. 79-87.
- Marcal, A.R.S.; Rodrigues, A.; Cunha, M. (2010). *Evaluation of satellite image segmentation using synthetic images*. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Honolulu, HI, 2010, pp. 2210-2213.
- Nelson, M.D.; McRoberts, R.E.; Holden, G.R.; Bauer, M.E. (2009). *Effects of satellite image spatial aggregation and resolution on estimates of forest land area*. *International Journal of Remote Sensing*, v. 30, n. 8, p. 1913-1940.
- Maver, L.; Scarff, L. *Multispectral image simulation*. *Proceedings SPIE*, v.1904, p. 144-160, 1993.
- Sassenrath, G.F., Alarcon-Calderon, V.J., Pringle, H.C. (2003). *Synthetic imagery of cotton crops: Scaling from leaf to full canopy*. *Digital Imaging and Spectral Techniques: Applications to Precision Agriculture and Crop Physiology*. T. van Taoi, ed.. pp. 111-133. Agronomy Society of America Special Publication Number 66, Madison, WI.
- Schott, J.R. (1997). *Remote sensing the image chain approach*. New York, NY: Oxford University, 394305169.
- Schott, J.R.; Raqueno, R.V.; Raqueno, N.G.; Brown, S. D. A. (2010). *Synthetic Sensor/Image Simulation Tool to Support the Landsat Data Continuity Mission (LDCM)*. In *Proceedings of ASPRS 2010 Annual Conference*, San Diego, CA, USA, 26-30 April 2010.
- Schott, J.; Gerace, A.; Brown, S.; Gartley, M.; Montanaro, M.; Reuter, D.C. (2012). *Simulation of Image Performance Characteristics of the Landsat Data Continuity Mission (LDCM) Thermal Infrared Sensor (TIRS)*. *Remote Sens.* 4, 2477-2491.
- Stelle, C. A.; Ariza-López, F. J.; Ureña-Cámara, M. A. (2018). *Synthetic Images Simulation (SIms): a Tool in Development*. In *Proceedings of the 4th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management (GISTAM 2018)*, pages 313-318, Funchal.
- Yang, G.; Liu, Q.; Liu, Q.; Huang, W.; Wang, J. (2009). *Simulation of high-resolution mid-infrared (3-5 mm) images using an atmosphere radiative transfer analytic model*. *International Journal of Remote Sensing*, vl. 30, n. 22, p. 6003-6022.

Sobre los autores

Carlos Alberto Stelle

Ingeniero Cartográfico por el Instituto Militar de Engenharia - IME (2005, Brasil) y Máster en Teledetección por el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (2011, Brasil).

Francisco Javier Ariza López

Dr. Ing. Agrónomo, Catedrático de Universidad. Desarrolla su investigación en el campo de producción cartográfica y en el de los Sistemas de Información Geográfica.

Manuel Antonio Ureña Cámara

Dr. en Cartografía, Ingeniería Geodésica y Fotogrametría de la Universidad de Jaén desde 2006. Su principal área de investigación se centra en los Sistemas de Información Geográfica, Teledetección y Cartografía como ciencia de apoyo y muy especialmente en la Generalización Cartográfica como investigación de base. En la actualidad también desarrollo investigaciones relativas a control de cartografía usando técnicas GPS y confluencia cartográfica, colaboro con diversos grupos de investigación en análisis de MDE y MDS para la obtención de información geomorfológica, así como en aspectos de elaboración de cartografía y aplicación de las diferentes tecnologías de la información.