

# Métodos visuales para la evaluación de la calidad de un modelo digital de terreno

Sarah Cernuda Rodríguez\*

*Recibido el 7 de mayo de 2014; aceptado el 15 de julio de 2014*

## Abstract

Over many years, techniques and methods have been developed for the quality evaluation of Digital Terrain Models (DTM). Whereas statistical methods are based on numerical procedures, visual methods depend on the observer's sensory mechanisms, his educational status, his familiarity with DTM, etc., which implies a high degree of subjectivity. Visual methods for DTM analysis may be applied to digital displays and on different computers without resorting to extra data as occurs with statistical methods. Visual methods are classified according to whether the spatial analysis operations are based on a set of data, on multiple data sets, on a statistical spatial analysis or whether they are non-spatial observations. The authors conclude that statistical methods and visual methods are both necessary in this task.

Key words: *Digital Terrain Models, quality control, measures of the quality, display.*

## Resumo

Ao longo do tempo têm se desenvolvido técnicas e métodos para avaliar a qualidade dos modelos digitais do terreno (MDT). A diferença dos métodos estatísticos, que são baseados em procedimentos numéricos, dos métodos visuais é que estes dependem do observador através de seus mecanismos sensoriais, condicionantes educativas, relação com o MDT, etc., o que implica um alto grau de subjetividade. Os métodos visuais para a análise dos MDT, podem ser aplicados em telas digitais de diferentes equipamentos, sem que se recorra a dados extras como ocorrem nos métodos estatísticos. Os métodos visuais se classificam segundo as operações de análises espaciais baseadas em conjuntos de dados, em conjuntos de dados múltiplos, em uma análise espacial estatística ou então, em visualizações não espaciais.

\* ETSI Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, C/Soria, 9.33208, Gijón, España, correo electrónico: sarah.crodriguez@alumnos.upm.es

Se verá que os autores têm chegado a conclusão que, tanto os métodos estatísticos como os visuais são necessários para essa tarefa.

Palavras chave: *modelos digitais de terreno, controle de qualidade, medidas de qualidade, visualização.*

## Resumen

A lo largo del tiempo se han podido desarrollar técnicas y métodos para la evaluación de la calidad de los modelos digitales del terreno (MDT). A diferencia de los métodos estadísticos basados en procedimientos numéricos, los métodos visuales dependen del observador a través de sus mecanismos sensitivos, condiciones educativas, relación con el MDT, etcétera, lo que implica un alto grado de subjetividad. Los métodos visuales para el análisis de los MDT, se pueden aplicar en pantallas digitales y en diferentes equipos, sin recurrir a datos extra como ocurre en los métodos estadísticos. Los métodos visuales se clasifican según si las operaciones de análisis espacial están basadas en un conjunto de datos, en conjuntos de datos múltiples, en un análisis espacial estadístico o bien que se trate de visualizaciones no espaciales. Se verá que los autores han llegado a la conclusión que tanto los métodos estadísticos como los visuales son necesarios en esta tarea.

Palabras clave: *modelos digitales del terreno, control de calidad, medidas de la calidad, visualización.*

## Introducción

Los modelos digitales son una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades o atributos. Concretamente, un Modelo Digital del Terreno (MDT) se ha definido (Kraus, Briese, Attwenger, Pfeifer, 2004) como un conjunto de datos numéricos que describen la distribución espacial de una característica del territorio.

Gracias a la evolución de las nuevas tecnologías se ha podido trabajar con sistemas de información geográficas (SIG), manejando y analizando información de los MDT. Además del desarrollo de los SIG, se ha producido un auge en la evaluación de la calidad (Podobnikar, 2009), debido al desarrollo de nuevos métodos para la toma de los datos y de la creciente disponibilidad de fuentes de datos adicionales.

Puesto que el análisis estadístico y morfométrico juega un papel importante entre las fases de generación de un MDT, la calidad ha de ser evaluada con los métodos adecuados como se detalla en este artículo. Se ha de fomentar la aplicación de los métodos visuales en la evaluación de la calidad, ya que éstos permiten de manera sencilla y gráfica detectar problemas complejos en la calidad del MDT sin la necesidad de datos adicionales de referencia. Sin embargo, exigen por parte del observador cierto conocimiento sobre el MDT a estudiar.

## La calidad

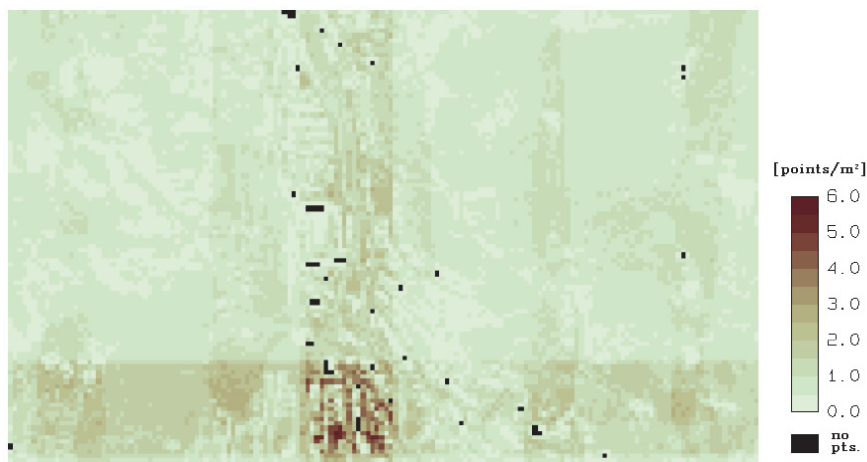
Para la evaluación de la calidad de un MDT, es necesario estudiar la calidad del conjunto de datos usados en su construcción, y su propia calidad una vez producido.

### Calidad de los datos

Entre los métodos de evaluación de la calidad de los datos, se distinguen los métodos *a priori* y *a posteriori* (Podobnikar, 2009). Los métodos *a priori* son aquellos que se basan en el análisis del conjunto de datos utilizado para la producción del MDT, mientras que los métodos *a posteriori* se basan en el propio MDT una vez producido. En muchos casos los datos de entrada no suelen estar disponibles, por lo que los métodos *a posteriori* se convierten en la mejor opción para la evaluación de la calidad.

*A priori* se estudian (Karel, Pfeifer, Briese, 2006) tres aspectos de la calidad de los datos, como son la distribución espacial de los datos, la exactitud de las mediciones y la consistencia de los datos. Para analizar el primero de los aspectos anteriores, se puede trabajar con mapas de densidades (véase Figura 1), pudiendo ser agregados los histogramas que facilitan la visión de los datos obtenidos.

Otra modalidad de análisis para el mismo aspecto son los mapas de distancias o los mapas de clases de datos (Karel, Pfeifer, Briese, 2006), donde se pueden representar conjuntos de datos con diversa información.



**Figura 1.** Mapa de densidad de un conjunto de datos con píxel de tamaño  $100\text{m}^2$ . Representa la discretización del terreno mediante el número de puntos por unidad de área. Se observa las bandas de alta densidad horizontales en la parte inferior y verticales en el centro.

La exactitud de las mediciones (Karel, Pfeifer, Briese, 2006) es importante en la calidad del MDT. Mediante mapas sigma-z y sigma-xy, se puede estudiar la distribución de la exactitud, ya que éstos representan esta variable mediante bandas horizontales o verticales.

### **Modelo de calidad**

Además del control de calidad de los datos usados para crear el MDT, es necesario conocer la exactitud del propio MDT. Para ello se estudia la calidad interior y exterior del mismo (Karel, Pfeifer, Briese, 2006), la calidad interior estudia cómo se ajusta el modelo a los datos utilizados para la producción, mientras que la calidad exterior estudia el ajuste del modelo a los datos adicionales.

En el control de la calidad interior, la redundancia juega un papel importante. Ésta permite identificar errores aleatorios en el proceso de creación del modelo, que se pueden eliminar con métodos como Kriging (Karel, Pfeifer, Briese, 2006), ya que éste es un método de interpolación que permite la estimación de errores en función de la distancia a los datos más próximos, y permite determinar la magnitud y la variación del error mediante el variograma.

Propio de un método *a priori*, en la calidad exterior se analizan los datos adicionales a los utilizados para la generación del MDT. Para establecer buenas medidas y técnicas de modelado de un MDT, son necesarios modelos empíricos que permiten estimar la exactitud (Karel, Pfeifer, Briese, 2006), además de los métodos visuales que son útiles en la detección de errores en la calidad de los MDT *a posteriori*, dependiendo de los conocimientos del observador.

### **Procedimientos de evaluación de la calidad**

Según se afirma (Podobnikar, 2009), para llevar a cabo una buena evaluación de la calidad es necesario seguir ciertos pasos en el proceso (véase Figura 2). Se emplean distintos conjuntos de datos espaciales para la aplicación de métodos visuales o estadísticos, pudiendo trabajar con un solo conjunto de datos o con varios, y finalizar con el análisis de los resultados tras aplicar cualquier método.

Los métodos visuales evalúan la calidad de un modo subjetivo y necesitan por parte del observador un conocimiento del terreno a evaluar, mientras que los métodos estadísticos evalúan la calidad de modo objetivo.

Los resultados obtenidos tras la aplicación de los diferentes métodos que aparecen en la figura anterior, que son números en el caso de los métodos estadísticos, mapas temáticos, visualizaciones no espaciales y otros tipos de visualizaciones en el caso de los métodos visuales, han de ser analizados y comparados con los valores esperados de la calidad del MDT. El análisis de los resultados de los métodos visuales resulta más complejo y menos objetivo, pero gracias a los SIG se permite una

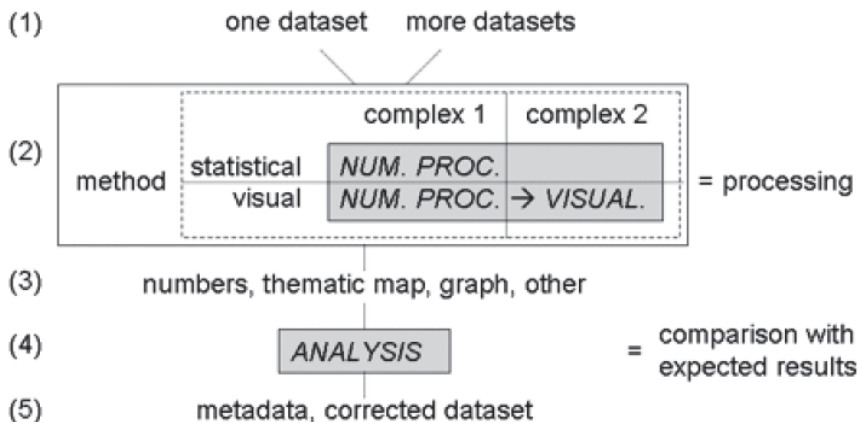


Figura 2. Procedimiento a seguir en la evaluación de la calidad de un MDT.

interpretación más sencilla de los resultados obtenidos de una evaluación de la calidad.

Según ISO 19115, los reportes de la calidad que se extraen se deben incluir en los metadatos una vez realizada la evaluación.

### Métodos visuales

#### *Visualizaciones basadas en conjunto de datos*

Esta categoría hace distinción entre métodos de representación del relieve con orientación, y métodos que utilizan procesos geométricos. En el primer caso, se trabaja con mapas de sombreado que representan la forma del relieve. En el segundo caso, los métodos geométricos se asemejan a productoras de líneas de contorno también llamadas curvas de nivel, que se encargan de una representación del relieve con mayor exactitud que la del caso anterior.

Los primeros experimentos con el método que utiliza el sombreado analítico tuvieron lugar en la década de 1960. En estos experimentos, surge el problema de los modelos de fuentes de iluminación simples (Lukas, Weibel, 1995), lo que ha llevado a los investigadores a realizar estudios para poder trabajar con múltiples fuentes de iluminación, ponderarlas acorde a un mapa de orientaciones e incluso crear efectos adicionales en el MDT.

Para visualizar los mapas derivados obtenidos a partir del MDT, existen varios controles básicos (Podobnikar, 2009) como son las visualizaciones de la pendiente, la orientación, la curvatura, la rugosidad del terreno, las características de la superficie en sentido fractal o la visualización de las celdas condensadas (véase Figura 3). Éstos permiten la detección de oscilaciones pequeñas consideradas como errores.

Otros métodos se basan en la detección de bordes mediante la aplicación de filtros de paso alto. Estos filtros tratan de aumentar el contraste entre niveles digitales vecinos, realzan los rasgos lineales de la imagen detectando fenómenos característicos como picos, fosas, etcétera, y utilizan un falso patrón (véase Figura 4).

### ***Visualizaciones basadas en datos múltiples***

Esta categoría comprueba la consistencia de los datos cuando se utilizan datos de referencia, donde éstos pueden ser reclasificados o superpuestos. Además, para el análisis de los datos se propone el uso de operaciones de análisis espacial como:

- Diferencia entre los MDT superpuestos.
- Combinación de diferentes MDT derivados.
- Curvas de nivel superpuestas a derivados (véase Figura 5).

### ***Visualizaciones según análisis especial estadístico***

Esta categoría se basa en generar pruebas estadísticas del conjunto de datos, y presentar los resultados de una manera similar a los casos anteriores, ya que se pueden ilustrar con figuras.

Para ello se apoya en el método de simulaciones de Monte Carlo (Felicísimo, 1995), método no estadístico numérico que se utiliza cuando la solución analítica del problema es compleja. Mediante la suposición de las distribuciones de probabilidad de las variables influyentes y el uso de generadores de números aleatorios, es posible llegar a construir empíricamente la función de probabilidad de la variable resultado.

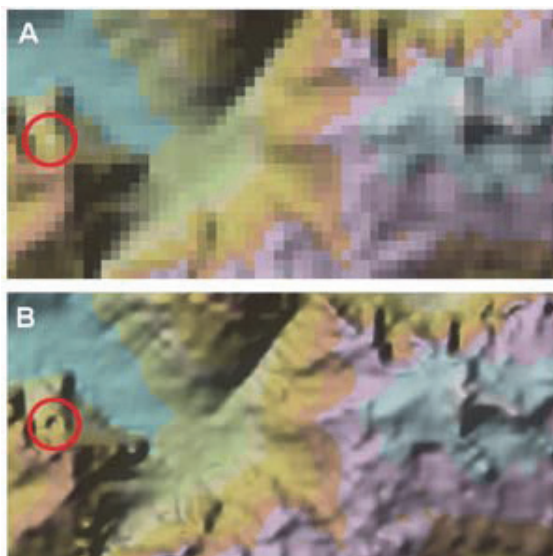
### ***Visualizaciones no espaciales***

Esta categoría tiene como resultado modelos de histogramas, gráficos, diagramas e incluso matrices (Podobnikar, 2009).

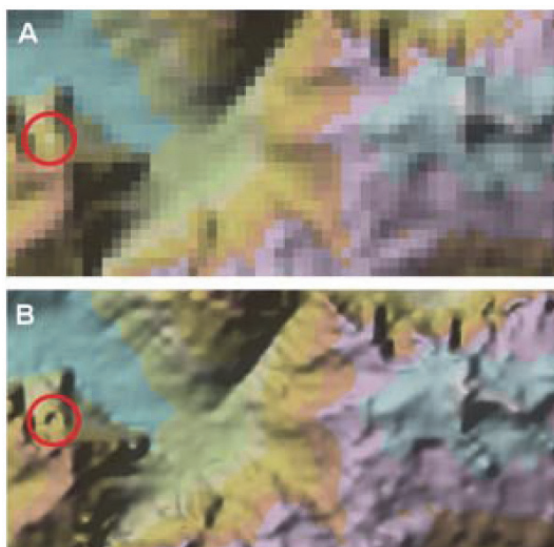
Los histogramas son pruebas estadísticas aplicables tanto a las alturas de los MDT, como a la orientación o la curvatura. Éstos se evalúan visualmente considerando a un MDT de alta calidad si la transición entre las columnas del histograma es suave, o si bien sigue un patrón repetitivo (véase Figura 6).

También se puede utilizar la matriz de co-ocurrencia (Presutti, 2004), que permite medir matemáticamente la textura del MDT. Ésta trabaja con la relación espacial entre dos píxeles denominados píxel de referencia y píxel vecino, y está basada en medidas estadísticas de segundo orden.

A partir de la matriz de co-ocurrencia (Presutti, 2004), también conocida como matriz de dependencia espacial o GLCM (Grey Level Co-occurrence Matrix), se obtiene la matriz normalizada, de la cual pueden derivarse diferentes medidas de un MDT como son la homogeneidad, el contraste o la correlación.

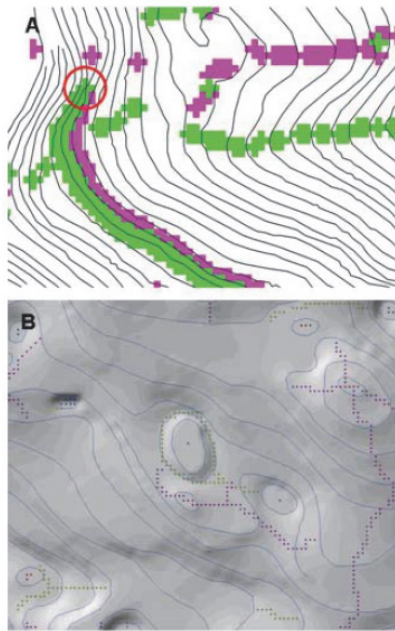


Tomada directamente de la fuente, y reducida para que quede del mismo tamaño que la otra. El artículo original está en: [http://sapiens.revues.org/pdf/738\\_](http://sapiens.revues.org/pdf/738_).

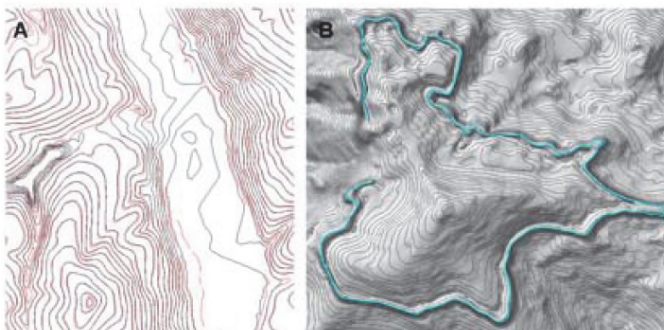


**Figura 3.** Sombreado de MDT. En la Figura 3A aparece el sombreado con resolución original. En la Figura 3B tras aplicar en 3A una interpolación con el algoritmo de spline se consigue detectar un fenómeno que no se aprecia en 3A indicado con el círculo en rojo.



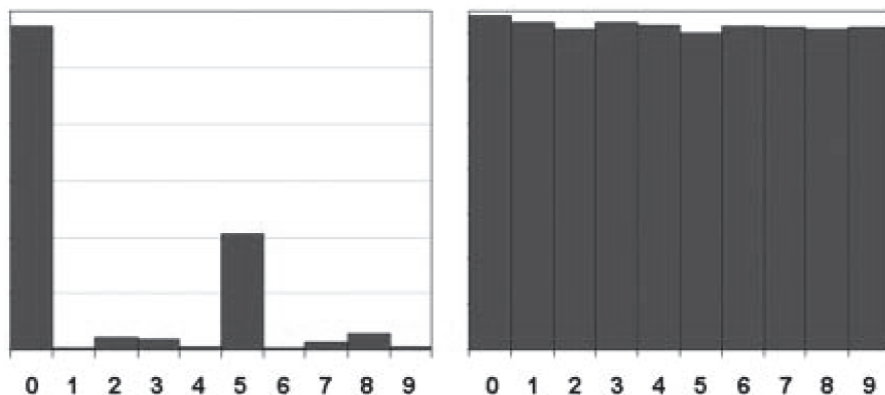


**Figura 4.** Utilización de un patrón falso para detección de estructuras. En la Figura 4A las curvas de nivel cruzadas indicadas con el círculo rojo provocan una combinación falsa de crestas y vaguadas (verde y rojo respectivamente). En la Figura 4B se detectaron errores evaluados mediante interpolación que representa el sombreado, y posiciones indeseadas de las crestas y vaguadas (puntos rojos y verdes respectivamente).



**Figura 5.** Curvas de nivel de un MDT. La Figura 5A muestra las curvas de nivel generadas por un MDT, en cambio en la Figura 5B se muestran las líneas curvas de nivel sobre un mapa derivado, en este caso un sombreado con orientación. En esta última se percibe la sensación de relieve que no se consigue en la Figura 5A.





**Figura 6.** Histogramas de MDT. El histograma de la izquierda representa un MDT producido por curvas de nivel. El histograma de la derecha representa un MDT generado fotogramétricamente. Se podría decir que el histograma derecho es más representativo de la realidad que el de la izquierda, porque representa la continuidad del terreno.

Según se afirma (Presutti, 2004) la ecuación (1) normaliza la matriz de co-ocurrencia, asumiendo que cuanto mayor es el valor de la diagonal en la matriz, más homogénea es la textura en esa parte de la imagen que está siendo analizada.

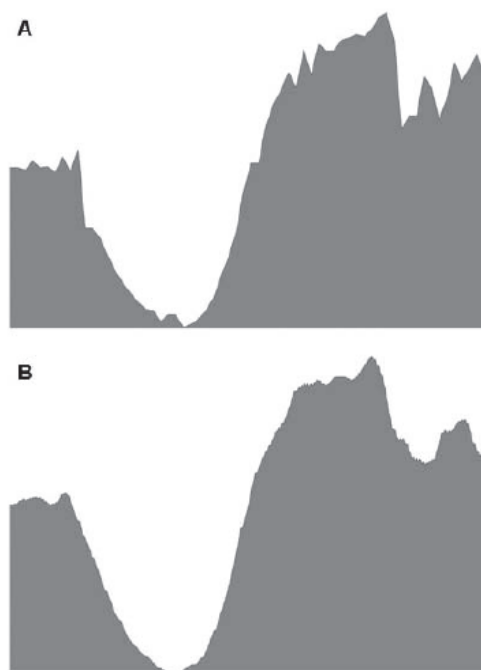
$$P_{i,j} = \frac{V_{i,j}}{\sum_{i,j=0}^{N-1} V_{i,j}} \tag{1}$$

Donde  $i$  es el número de filas,  $j$  es el número de columnas y  $V$  es el valor de la celda  $i, j$  en la ventana de la imagen analizada.  $N$  es el número de niveles de gris en la imagen, y el resultado  $P_{i,j}$  indica cuántas veces el valor  $j$  coocurre con el valor  $i$  en una relación espacial.

**Otras técnicas de visualización**

Existen más técnicas para visualizar aspectos de la calidad de un MDT, como son los caminos entre dos puntos específicos, que están basadas en operaciones analíticas espaciales (Podobnikar, 2009).

Por otro lado, se encuentra la utilización de perfiles del terreno, secciones verticales obtenidas por intersección de la superficie topográfica con un plano vertical que pasa por puntos determinados. En ellos se pueden percibir las irregularidades existentes, pudiendo representar la línea del perfil la altura del MDT (véase Figura 7).



**Figura 7.** Perfiles del terreno. El perfil A es muy áspero, ya que contiene errores graves. El perfil B presenta mayor calidad que el A, puesto que el terreno se considera como una superficie continua y A no presenta la continuidad de B.

## Conclusiones

Se pueden emplear diversos métodos en la evaluación de la calidad de un MDT, pero tanto los métodos estadísticos (objetivos) como los métodos visuales (subjetivos) son importantes en el proceso.

Los métodos visuales no requieren el estudio extra del propio MDT como los métodos estadísticos, pero como inconveniente se encuentra el requerir la familiarización del observador con el terreno o la adquisición de ciertos conocimientos para su análisis.

Pese a la poca utilización de los métodos más subjetivos, éstos aportan un procedimiento apto para la detección de una calidad alta o baja en un MDT.

## Bibliografía

Felicísimo, A.M. (1995). "Error Propagation Analysis in Slope Estimation by Means of Digital Elevation Model", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 49, pp. 29-33.

- Karel, W.; Pfeifer, N. y C. Briese (2006). "DTM Quality Assessment", ISPRS Technical Commission II, pp. 7-11.
- Kraus, K.; Briese, C.; Attwenger, M. y N. Pfeifer (2004). "Quality Measures for Digital Terrain Models", ISPRS Technical Commission II, pp. 113-118.
- Lukas, K. y Weibel R. (1995). "Assessment and Improvement of Methods for Analytical Hillshading", Proceedings 17<sup>th</sup> International Cartographic Conferences, vol. 2, pp. 2231-2240.
- Podobnikar, T. (2009). "Methods for Visual Quality Assessment of a Digital Terrain Model", *Sapiens*, vol. 2, pp. 2-9.
- Presutti, M. (2004). "La matriz de co-ocurrencia en la clasificación multiespectral", 4<sup>a</sup> Jornada de Educação em Sensoriamento Remoto no Âmbito do Mercosul, Brasil, pp. 1-9.