

MODELO DE ANÁLISIS DE SUBPÍXELES APLICADO A LA CARTOGRAFÍA DE INUNDACIONES EN ZONAS DE LLANURA

J.D. Giraldo y S. García.

*Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos. Universidad Politécnica de Cartagena.
Paseo Alfonso XIII, 52. 30203. Cartagena. España juan.giraldo@upct.es*

RESUMEN

Las técnicas de clasificación tradicionales de imágenes satélite utilizan “métodos duros” en el sentido que un píxel es asignado a una única clase de cobertura. Los “métodos suavizados” pueden ser utilizados con el fin de asignar diferentes clases de cobertura al interior de los píxeles gruesos. Se ha desarrollado una metodología de Análisis de Subpíxeles para el seguimiento de inundaciones en áreas extensas en base a imágenes de satélite y Modelos de Elevación Digital (MED). El procedimiento desarrollado se apoya en las hipótesis del Modelo de Mezcla Lineal (MML) y el Análisis de Coherencia Espacial (ACE). MML construye los mapas de fracciones de cobertura para cada clase, mientras que ACE define la ubicación más probable para estas fracciones de cobertura al interior del píxel grueso. Se utiliza un MED para una mejor identificación de los patrones del drenaje (algoritmo DDM – *Drenaje desde MED*). Se mejora así la clasificación de las zonas inundadas utilizando los mapas de direcciones de drenaje y flujo acumulado, derivados desde el MED. Esta metodología presenta aplicaciones potenciales en el seguimiento dinámico y delimitación de zonas inundadas en amplias extensiones para estimación de daños, en base a imágenes de moderada resolución espacial.

ABSTRACT

The common classification techniques of satellite images use “hard methods” in the sense that a pixel is assigned to a unique land cover class. “Soft methods” can be used in order to assign several land cover classes in coarse pixels. A Sub-pixels Analysis method has been developed for flood monitoring in large areas using satellite images and Digital Elevation Models (DEM). The method is based on hypothesis of both the Linear Mixture Model (LMM) and the Spatial Coherence Analysis (SCA). The LMM builds the cover fraction maps for each land cover class, while the SCA computes the most likely place for sub-pixels in the coarse pixels. A DEM, and its associated drainage map and flow accumulation map, were used in order to improve the flooded area delimitation using the flow path between “flooded” clusters (*Drainage on DEM -DOD-* algorithm). The methodology permits the dynamic monitoring of floods in large areas based on satellite images with moderate spatial resolution, achieving accurate results, and permits an adequate response from the stakeholders.

Palabras clave: teledetección, inundaciones en llanura, análisis de subpíxeles, coherencia espacial.

INTRODUCCIÓN

El registro de variables hidrológicas de una inundación frecuentemente falla al capturar los eventos extremos. La teledetección y técnicas basadas en Sistemas de Información Geográfica (SIG) se han convertido en una herramienta clave para el análisis de planicies de inundación, su evolución geomorfológica y de los usos del suelo desde un punto de vista regional (Andersen *et al.*, 2001, y Sanyal y Lu, 2004). Estas herramientas cobran vital importancia en países en vías de desarrollo, dado sus bajos costes económicos, para delimitar espacialmente y estimar daños causados por inundaciones. La integración de la información de distintas fuentes (sensores ópticos y de radar, MED, mapas de usos del suelo, etc.), permite alcanzar estos objetivos de una forma efectiva.

En el presente trabajo, se describen las hipótesis básicas de la metodología de Análisis de Subpíxeles aplicada a la identificación de áreas inundadas en zonas de llanura desde teledetección. Se presentan resultados en una zona del valle del Río Senegal (África), mediante una herramienta computacional que permite realizar una clasificación “suave” de las imágenes. Aspectos destacables del desarrollo y aplicación, son la utilización de información espacio-temporal de acceso libre (imágenes de satélite y MED) y un SIG de código abierto.

METODOLOGÍA: ANÁLISIS DE SUBPÍXELES

Las técnicas de clasificación “duras” asignan a un píxel grueso una única clase de

cobertura. Para las resoluciones más gruesas los píxeles inevitablemente estarán mezclados, por lo que técnicas de clasificación “suavizadas” pueden ser utilizadas, asignando a un píxel diferentes clases de cobertura (Verhoeve y De Wulf, 2000). El alto número de píxeles mezclados o no clasificados adecuadamente hace necesario obtener información a nivel de subpíxel, de tal forma que se asegure una estimación precisa del área inundada total (Nyborg y Sandholt, 2001).

El Análisis de Subpíxeles pretende aprovechar toda la información contenida en las bandas para cada uno de los píxeles, logrando para cada píxel una clasificación con resolución más fina. La solución que se propone se apoya en las hipótesis del MML en conjunto con hipótesis de dependencia espacial de los datos y un MED de la zona de estudio para la clasificación de las zonas inundadas. El Análisis de Subpíxeles se ha desarrollado bajo el SIG GRASS (Geographical Resources Analysis System). En primer lugar, se aplican los procedimientos MML y ACE (comando *i.subpixel*). Se obtienen así los mapas de fracciones de cobertura para cada clase pura, y su ubicación al interior del píxel grueso. A continuación, se analizan los patrones de drenaje desde el terreno mediante el algoritmo DDM (comando *i.dod*) para mejorar la identificación de zonas inundadas. Finalmente, se aplica un procedimiento de Identificación de Clúster Aislados (ICA) o pequeños clúster espurios (comando *i.isolated*), que se reclasifican para eliminar el ruido del mapa clasificado. Los aspectos teóricos más relevantes de los diferentes procedimientos, se presentan a continuación.

Modelo de Mezcla Lineal (MML)

El MML se basa en una hipótesis fundamental: la radiancia (o reflectancia) medida en el sensor es una combinación lineal de las radiancias reflejadas por las superficies individuales al interior del píxel, cuyas firmas espectrales son únicas y bien discriminadas (Hongen *et al.*, 2004). Estas superficies individuales se denominan clases puras.

En la Figura 1 se presenta el caso de un píxel “grosso” que tiene en su interior tres clases de cobertura diferentes (40% de clase “azul”, 40% de “rojo” y 20% de “verde”). El sensor puede no presentar la adecuada resolución espacial para captar las coberturas individualmente, por lo que capta un único valor de reflectancia en la banda Ω para todo el píxel grueso ($R_{PIXEL,\Omega}$). De acuerdo con la suposición del MML, se podría plantear para cada banda del satélite, lo siguiente:

$$R_{PIXEL,\Omega} = 0.4 \cdot R_{AZUL,\Omega} + 0.4 \cdot R_{ROJO,\Omega} + 0.2 \cdot R_{VERDE,\Omega} + \varepsilon_{\Omega} \quad (1)$$

donde $R_{AZUL,\Omega}$, $R_{ROJO,\Omega}$ y $R_{VERDE,\Omega}$ son valores de referencia para la reflectancia de cada una de las clases puras para la banda Ω (firma espectral de cada clase), y ε_{Ω} es el error en el que se incurre al calcular la radiancia del píxel grueso como una combinación lineal de estos valores de referencia.



Figura 1. Píxel grueso con diferentes clases de cobertura en su interior.

El problema para el MML se soluciona planteando un sistema de ecuaciones con restricciones para minimizar el sumatorio de ε_{Ω} en todas las bandas, que debe ser resuelto mediante técnicas de aproximación (analíticas o numéricas). La solución del MML ha sido abordada en la literatura de diversas formas (Hu *et al.* 1999; Verhoeve y De Wulf, 2000).

En el presente trabajo se utiliza la técnica de los Multiplicadores de Lagrange (Hu *et al.*, 1999; Aban *et al.*, 2002), que busca la solución de forma analítica y con mayor velocidad que los métodos iterativos. El MML construye los mapas de fracciones de coberturas para cada clase.

Análisis de Coherencia Espacial (ACE)

De acuerdo con Verhoeve y De Wulf (2000), el problema clave de la organización de los subpíxeles es determinar la ubicación más probable de las fracciones de cada clase de cobertura dentro del píxel. La suposición de dependencia espacial al interior y entre píxeles puede resolver este problema.

La Figura 2 plantea la cuestión a resolver: en a) se presentan las fracciones de cobertura asociadas con la clase “gris” para cada uno de los píxeles gruesos. En b) los píxeles gruesos han sido divididos en 5x5 subpíxeles, y los correspondientes con la clase “gris” han sido asignados de acuerdo con las fracciones de cobertura indicadas, pero no se ajustan con la estructura espacial esperada por la dependencia espacial. La solución alternativa c) ha maximizado la dependencia espacial al interior de los píxeles y entre ellos.

En el presente trabajo se ha abordado la solución con técnicas de programación lineal propuestas en el trabajo de Hongen *et al.* (2004). Un MED es utilizado para recalcular la matriz de dependencia espacial, de manera que se favorezca la ubicación de los subpíxeles de la clase “inundado” en las depresiones del terreno.

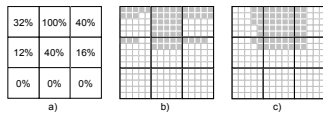


Figura 2. Problema de organización espacial de subpíxeles al interior de cada píxel (adaptado de Verhoeve y De Wulf, 2000).

Algoritmo de Drenaje desde MED -DDM-

Hasta este punto, los píxeles inundados se han identificado en base a criterios que combinan las hipótesis del MML y el ACE. Sin embargo, aún existirán píxeles clasificados como “no inundado” que se encuentran en la trayectoria de drenaje desde clúster de píxeles identificados como “inundado”. Si un píxel es atravesado por varias trayectorias de drenaje es razonable considerar que también se encuentra “inundado”.

La metodología DDM fue presentada por Giacomelli *et al.* (1997). Se define un valor umbral del número de trayectorias de drenaje que debe atravesar un píxel “seco”, para reclasificarlo como “inundado”. Los resultados del método son muy sensibles a la selección del umbral. Debido a ello, el presente trabajo presenta una modificación al método original basada en la agregación de píxeles inundados en la dirección del drenaje. El algoritmo requiere usar el mapa de direcciones de drenaje y el mapa de flujo acumulado, derivados desde el MED.

Identificación de Clúster Aislados (ICA)

Los procedimientos de clasificación de imágenes de satélite frecuentemente generan regiones aisladas o clúster de pocos píxeles inconexos. Existen dos razones principales que lo explican (Jianghong *et al.*, 2004): a) El algoritmo de clasificación no es suficientemente preciso, o la firma espectral de alguna clase de cobertura difiere según las condiciones; b) El elemento que representa la región aislada es real (*e.g.* una pequeña isla en el océano). Adicionalmente, la clasificación a nivel de subpíxeles genera numerosos clúster aislados al aplicar el procedimiento conjunto MML – ACE. Su identificación se efectúa aplicando la metodología presentada por Jianghong *et al.* (2004). Los píxeles que deben ser reclasificados son asignados de acuerdo con un filtro gaussiano, en base a píxeles vecinos correctamente clasificados.

ZONA DE ESTUDIO Y PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN

La zona de estudio corresponde al Lago Guier, en el Valle del Río Senegal (Figura 3).

La información utilizada ha consistido en dos imágenes Landsat ETM+ del día 12/01/2002 (path-row 205-48 y 205-49), resolución espacial de 30 m, y una imagen MODIS MOD09GHK (satélite TERRA) para la misma fecha., con 500 m de tamaño de celda. Asimismo, se ha recolectado desde internet un MED con 90 m de resolución espacial (toda la información está disponible en United States Geological Survey, www.usgs.gov).

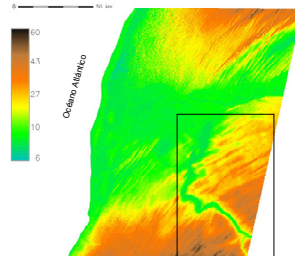


Figura 3. Zona de estudio. MED del Valle del río Senegal. Lago Guier.

Las áreas de entrenamiento en la imagen MODIS se han identificado con el mapa de NDVI, junto con composiciones de color. Se han definido cinco clases significativas. La imagen MODIS fue sometida a una clasificación supervisada tradicional (resolución espacial original), y otra aplicando el análisis de subpíxeles (50 m de tamaño de celda).

Con la imagen Landsat se ha realizado una clasificación no supervisada, identificando nueve clases en el escenario. Dos clases fueron combinadas para definir la clase agua. Esta clasificación se consideró de referencia, para comparar la bondad de la clasificación del procedimiento tradicional supervisado y del análisis de subpíxeles aplicado a la imagen MODIS.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las matrices de confusión constituyen un indicador de la calidad de la clasificación. Desde la matriz de confusión (0), se observa que la metodología del análisis de subpíxeles mejora sustancialmente la identificación de las zonas inundadas (87,9%) frente a la clasificación supervisada (52,8 %). Las zonas secas son mejor identificadas por la clasificación supervisada (99,97%) debido a la escasa identificación de píxeles inundados. El análisis de subpíxeles logra identificar correctamente el 98,2% de las zonas secas.

Tabla1.- Matriz de confusión para la zona del Lago Guier.

| Clasificación supervisada | Análisis de subpíxeles | | | |
|---------------------------|------------------------|--------|--------|--------|
| | Seco | Agua | Seco | Agua |
| Seco | 99,97% | 0,03% | 98,20% | 1,80% |
| Agua | 47,24% | 52,76% | 12,06% | 87,94% |

Columnas: Clases asignadas (imagen MODIS).
Filas: Datos de referencia (imagen Landsat).

La Figura 4 presenta gráficamente los resultados en la zona del Lago Guier para ambos procedimientos de clasificación; la notación es la siguiente: (a) áreas secas correctamente clasificadas; (b) áreas inundadas incorrectamente clasificadas como secas; (c) áreas secas incorrectamente clasificadas como inundadas; y (d) áreas inundadas correctamente clasificadas (en color rojo). Las clases (b)+(d) constituyen las zonas inundadas clasificadas por la imagen Landsat.

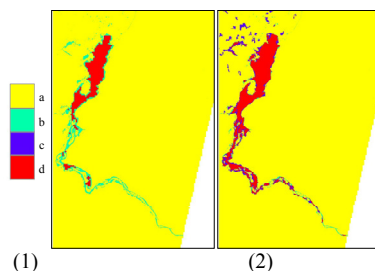


Figura 4. Resultados de la clasificación en el Lago Guier: (1) Supervisada, y (2) Análisis de subpíxeles.

CONCLUSIONES

El Análisis de Subpíxeles ha demostrado ser eficiente en la delimitación de planicies de inundación. El procedimiento desarrollado efectúa una clasificación “suavizada” de mejor resolución espacial al extraer información a nivel de subpíxel. Se tiene en cuenta en el proceso un MED de la zona de estudio para mejorar la identificación de las zonas inundadas.

El Análisis de Subpíxeles se ha aplicado en la zona del Valle del Río Senegal, mostrando mejores resultados en la clasificación de las zonas inundadas que un algoritmo de clasificación supervisada tradicional.

La metodología desarrollada presenta como ventaja su aplicación directa en el seguimiento de eventos altamente dinámicos, como son las inundaciones, utilizando imágenes de satélite de moderada resolución espacial y con alta resolución temporal. Luego, al basarse en información

libremente accesible, su aplicación por parte de responsables de la toma de decisión en países en vías de desarrollo es potenciada.

BIBLIOGRAFÍA

Aban, J. E. L., Tsolmon, R., and Tateishi, R., 2002. Linear mixing model based on optimization method for land cover mapping using LANDSAT ETM+ and SPOT-HRV data. *Proc. Geosci. and Rem. Sensing Symp.*, 6, 3483-3485.

Andersen, J., Refsgaard, J., Jensen, K. H., 2001. Distributed hydrological modelling of the Senegal river basin – model construction and validation. *J. Hydrol.*, 247, 200-214.

Giacomelli, A., Mancini, M. and Rosso, R., 1997. Integration of ERS 1 PRI imagery and digital terrain models for the assessment of flooded areas. In: *The 3rd ERS Symp.(ESA)*. Italy.

Hongen, Z., S. Liu, Q. Lin and J. Shi, 2004. Sub-pixel lake mapping in Tibetan Plateau. *Proc. of Geosci. and Rem. Sensing Symp.*, 5, 3073-3076.

Hu, Y. H., Lee, H. B. and Scarpace, F. L., 1999. Optimal Linear Spectral Unmixing. *IEEE Transactions on Geosci. and R.. S.*, 37 (1), 639-644.

Jianghong, S., Zhongming, Z., Qingye, Z. and Yangeng, W., 2004. An algorithm for eliminating the isolated regions based on connected area in image classification. In: *Proc. IGARSS 2004*.

Nyborg, L. and Sandholt, I., 2001. NOAA-AVHRR based flood monitoring. In: *Proc IGARSS 2001*.

Sanyal, J., and Lu, X., 2004. Remote sensing and GIS-based flood vulnerability assessment of human settlements: a case study of Gangetic West Bengal, India. *Hydrol. Process.* 19, 3699-3716.

Verhoeve, J and Wulf, R. D., 2000. Sub-pixel Mapping of Sahelian Wetlands using Multi-temporal SPOT VEGETATION Images. *Proc. VEGETATION 2000*.

AGRADECIMIENTOS

Ha sido financiado por EU FP6 Integrated Project AMMA (Ref. FP6-004089).