

COMPARACIÓN DE ÍNDICES DE FRAGMENTACIÓN ESTIMADOS EN IMÁGENES DE SATÉLITE CON DISTINTA RESOLUCIÓN ESPACIAL

Santiago Saura Martínez de Toda

ssaura@eagrof.udl.es

Dept. d'Enginyeria Agroforestal. ETSEA. Universitat de Lleida. Av. Alcalde Rovira Roure, 191. 25198. Lleida

RESUMEN: El creciente uso de índices de fragmentación para la caracterización del estado de conservación y de los cambios en el paisaje se ve limitado por el escaso conocimiento sobre su comportamiento frente a la resolución espacial de los sensores remotos. Estudiamos el efecto de la resolución espacial en seis índices de fragmentación ampliamente utilizados, analizando para ello datos categóricos derivados de imágenes coetáneas Landsat-TM e IRS-WiFS, así como patrones TM clasificados y agregados a resoluciones más groseras mediante filtros de mayoría. En general, los filtros de mayoría tienden a producir patrones más fragmentados que los obtenidos directamente de la información captada por los sensores remotos. Se sugiere que se debe tener en cuenta la función de extensión del sensor para mejorar la comparabilidad de las estimaciones de fragmentación obtenidas a partir de imágenes de satélite con distinta resolución espacial. Las leyes potenciales de escalamiento son capaces de predecir las variaciones con la resolución espacial de distintos índices de fragmentación, con errores medios por debajo del 10%. Todos los índices salvo el de cohesión indican menor fragmentación para resoluciones más groseras. El índice de división resulta ser el menos sensible a los efectos de la resolución espacial de los aquí considerados.

ABSTRACT: Fragmentation indices are increasingly being used for landscape pattern condition assessment and land cover change characterisation. However, their potential is limited by the lack of knowledge on their behaviour as a function of sensor spatial resolution. We examine the effect of spatial resolution on six widely used fragmentation indices. We analyse categorical data derived from simultaneously gathered Landsat-TM and IRS-WiFS satellite images, as well as TM patterns aggregated to coarser resolutions through majority rules. In general, majority rules tend to produce more fragmented patterns than actual sensor ones. It is suggested that sensor point spread function should be specifically considered to improve comparability among satellite images of varying spatial resolutions. Power scaling-laws were able to predict the variations with spatial resolution of several fragmentation indices, with mean prediction errors under 10%. All metrics but patch cohesion indicated lower fragmentation at coarser spatial resolutions. Landscape division was found to be the least sensitive index to spatial resolution effects.

Palabras clave: fragmentación, resolución espacial, índices del paisaje, escala, imágenes de satélite.

INTRODUCCIÓN

La cuantificación de la fragmentación a través de índices calculados sobre imágenes de satélite clasificadas es cada vez más común en el ámbito de la ecología del paisaje y de las ciencias de la tierra en general (*e.g.*, Chuvieco 1999, Imbernon y Branthomme 2001). Al mismo tiempo, hay actualmente disponible una gran variedad de sensores remotos con distintas resoluciones espaciales, existiendo la necesidad de manejar y comparar las informaciones a distintas escalas proporcionadas por los mismos. Actualmente no se conoce bien cómo se comportan los índices de fragmentación ante cambios en la resolución espacial, a pesar de que éste ha sido el objeto de diversos estudios en los últimos años (Benson y MacKenzie 1995, Wickham y Riitters 1995, Frohn

1998, Saura 2001, Wu *et alii.* 2002). En general, se recomienda no comparar los índices de fragmentación estimados a distintas escalas, y esta línea de investigación se considera una de las prioritarias en este ámbito (Wu y Hobbs 2002). En este estudio pretendemos avanzar en el esclarecimiento de las siguientes cuestiones: cómo se comportan los índices de fragmentación al variar la resolución espacial? Qué índices se pueden comparar directamente entre sensores con distinta resolución espacial? Existe algún procedimiento corrector que haga sus valores comparables a distintas escalas?

MÉTODOS

Para este estudio se seleccionó una región

en España central cubierta por dos escenas coetáneas captadas por los satélites IRS-WiFS (180 m de resolución espacial) y Landsat-TM (30 m) el 29 de septiembre a las 11:33 y 10:32 respectivamente (Saura 2001). El área de solape entre ambas se dividió en cuatro zonas independientes de 300.000 ha (2.000x2.000 píxeles TM) que pudieran ser manejadas en los análisis posteriores y que permitieran evaluar la robustez de los resultados obtenidos para las distintas zonas. En cada una de las zonas se calculó el NDVI para cada uno de los sensores. A partir del NDVI se generaron imágenes categóricas para cada sensor y zona, mediante valores umbrales que clasificaron cada una de ellas en dos clases: alto y bajo NDVI. Los valores umbrales (diferentes para TM y WiFS) se seleccionaron de manera que la abundancia de la clase de alto NDVI (porcentaje del área total de la zona ocupada por dicha clase) variara del 10 al 90% con un intervalo del 10%. De esta manera se cubrió de manera sencilla todo el rango de abundancias de clase, lo cual es especialmente importante ya que se ha puesto de manifiesto que dicha abundancia de la clase puede tener una importante influencia en el comportamiento con la escala de estos índices (Saura y Martínez-Millán 2001, Saura 2002).

Por otro lado, se aplicaron filtros de mayoría a las imágenes binarias derivadas de la escena TM, degradándolas a distintas resoluciones espaciales, desde 30 a 1500 metros de resolución espacial. Los valores adoptados para el factor de agregación F fueron $F=1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 30$ y 50 (siendo F la relación entre la longitud de los píxeles de la imagen original y degradada o, simplemente, el número de píxeles de la imagen TM incluidos en la ventana de agregación).

Sobre todos estos datos se calcularon una serie de índices de fragmentación seleccionados por su importancia o amplio uso dentro del ámbito de la ecología del paisaje, y que en concreto están siendo utilizados dentro del Tercer Inventario Forestal Nacional (Ministerio de Medio Ambiente 2003). Los índices seleccionados son el número de teselas (NT), el tamaño medio de tesela (TMT), la longitud de bordes (LB), el tamaño de la tesela más grande (TMX), el índice de división (ID) y el índice de cohesión (IC). La descripción de estos índices se puede encontrar en Saura (2002). Una mayor fragmentación viene indicada por valores más altos de NT, LB e ID y por valores menores de TMT, TMX e IC. Para cada uno de los índices calculamos además su sensibilidad media normalizada (S_M) frente a cambios en la resolución espacial (Saura

2001), de manera similar a lo realizado en otros estudios en este ámbito (Saura y Martínez-Millán 2001, Saura 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Benson y MacKenzie (1995) concluyeron que la aplicación de filtros de mayoría permitía obtener buenas aproximaciones de los valores de los índices correspondientes a sensores con resoluciones espaciales más groseras. Sin embargo, nuestros resultados indican que esto no es del todo válido, al menos no para todos los índices de fragmentación considerados. NT, TMT y LB indican que los patrones obtenidos para la resolución WiFS mediante la aplicación de filtros de mayoría a los patrones TM son claramente más fragmentados que los directamente obtenidos de la imagen WiFS (Figura 1). Por el contrario, para el resto de los índices (TMX, ID, IC) no aparecen unas diferencias sistemáticas entre ambos tipos de datos (Figura 1). Esto se debe a que estos tres últimos índices se ven poco afectados por las pequeñas teselas (eventualmente píxeles aislados) que puedan existir en los datos espaciales, mientras que NT, TMT y LB son muy sensibles a la presencia de estas teselas de escaso tamaño (Saura 2002), que precisamente son mucho más abundantes en los patrones agregados que en los directamente derivados del sensor WiFS. Estas diferencias entre estos dos tipos de datos (sobre todo para índices como NT, TMT o LB) parecen deberse a una deficiencia intrínseca de los filtros de mayoría para escalar la configuración espacial a resoluciones más groseras. Hay que tener en cuenta que los sensores remotos no captan la radiación homogéneamente en una porción del terreno cuadrada nítidamente delimitada, como podría llevar a pensar la estructura de píxeles en la que se organiza la información captada por los sensores. Por el contrario, los objetos situados más cerca del centro de esa porción del terreno contribuyen en mayor medida a la señal recibida el sensor que los objetos situados en zonas periféricas de la misma (Cracknell 1998). Es decir, los sensores presentan funciones de extensión ("point spread functions") no lineales. Además, la señal que capta el sensor para píxeles adyacentes no es independiente, sino que existe un solapamiento entre las áreas sucesivas de las que se extrae la señal captada para cada píxel (Cracknell 1998). Esta autocorrelación extra que el propio sensor añade a la información espacial puede explicar porqué los patrones derivados directamente del sensor resultan menos fragmentados que los obtenidos mediante simples filtros de mayoría. Para mejorar la comparabilidad entre imágenes con distinta

resolución espacial es necesario desarrollar algoritmos de agregación que consideren específicamente la función de extensión del sensor, o bien aplicar, previamente a la clasificación de las imágenes, técnicas de deconvolución que permitan extraer la autocorrelación inducida por el propio sensor (Breaker 1990, Cracknell 1998, Huang et alii. 2002).

En cuanto a la sensibilidad media normalizada (S_M), los valores obtenidos para los seis índices considerados (NT, TMT, LB, TMX, ID e IC) son respectivamente 209.2, 2880.0, 251.5, 12.1, 10.6, y 86.5. Se puede observar que existen grandes diferencias en la sensibilidad de cada uno de los índices y que TMX y, sobre todo, el índice de división (ID) son los más robustos y adecuados para comparar directamente la fragmentación estimada en datos con distinta resolución espacial (Figura 1). El índice de división es también robusto ante variaciones en la unidad mínima cartografiada (Saura 2002), pero sin embargo no resulta especialmente adecuado para comparar la fragmentación de datos con distinta extensión espacial (Saura 2001).

En cuanto al índice de cohesión, la magnitud de sus variaciones depende principalmente de la abundancia de la clase. Cuando ésta es alta, IC apenas es sensible a cambios en la configuración espacial, mientras que IC disminuye fuertemente cuando la clase es poco abundante (Figura 1). IC es el único índice de los considerados que indica mayor fragmentación a resoluciones más groseras. De hecho, es posible obtener un valor arbitrariamente alto de este índice simplemente remuestreando los datos a resoluciones espaciales más finas (Saura 2001). Esto es debido al modelo de dispersión que utilizó Schumaker (1996) para desarrollar este índice (Saura 2003). Esta falta de estabilidad hace necesario considerar con cautela el uso de este índice para estimar la facilidad de dispersión de las poblaciones animales por el territorio, tal y como propuso Schumaker (1996). Sin embargo, es posible corregir la expresión de cálculo de IC de manera que se evite ese comportamiento inconsistente, se reduzca su sensibilidad a la resolución espacial, e indique una menor fragmentación a resoluciones más groseras (Saura 2003).

NT, TMT y LB son con diferencia los índices más sensibles; a priori, sus valores no se pueden comparar entre resoluciones espaciales distintas. Sin embargo, existen procedimientos para

predecir el comportamiento de estos índices con la resolución espacial, de manera que resulten comparables a distintas escalas. Las leyes potenciales se han venido utilizando en el ámbito de las ciencias de la tierra y de la teoría de fractales para caracterizar las distribuciones de tamaños de diversas entidades geográficas y para predecir la variación con la escala de determinadas magnitudes espaciales (Korvin 1992). En concreto, varios autores han puesto de manifiesto que las leyes potenciales permiten predecir las variaciones de distintos índices del paisaje en función de la resolución espacial (Frohn 1998, Wu et al. 2000, Saura 2001, Wu et al. 2002), de acuerdo a las siguientes expresiones equivalentes:

$$I(F) = k \cdot F^{-E} \quad \log(I(F)) = k' - E \cdot \log(F)$$

donde $I(F)$ es el valor del índice de fragmentación correspondiente a un factor de agregación F , k y k' son constantes ($k' = \log k$) y E es el exponente que caracteriza la ley potencial ($E > 0$ para índices que disminuyen para resoluciones más groseras, como es el caso de NT o LB). Tanto E como k' se obtuvieron como los coeficientes de una regresión lineal de mínimos cuadrados según la ecuación anterior. Dicha ecuación se ajustó a los valores de NT, TMT y LB obtenidos en las imágenes Landsat-TM ($F=1$) degradados a distintas resoluciones mediante filtros de mayoría (desde $F=1$ hasta $F=50$). En el caso de un ajuste perfecto k' sería igual a $\log(I(1))$, donde $I(1)$ es el valor del índice en los datos iniciales con la resolución espacial más fina ($F=1$).

Las regresiones proporcionaron valores de E entre 1.71 y 2.56 (con media 1.97) para NT y entre 0.85 y 1.19 (con media 0.97) para LB. En todos los casos se obtuvieron R^2 mayores que 0.96 para NT y TMT (por encima de 0.99 en 68 de esos 72 casos) y por encima de 0.992 para LB. Éste es un ajuste especialmente bueno, especialmente para el caso de EL. Sin embargo, los logaritmos utilizados en la regresión tienden a subestimar los residuos más grandes y podrían por tanto proporcionar valores de R^2 engañosamente elevados. Si calculamos el error relativo en la predicción de los valores de los índices a través de las leyes potenciales, obtenemos un error medio del 9.8% para NT (con una desviación estándar $s = 14.8\%$), 9.2% para TMT ($s = 9.7\%$), y sólo 4.5% para LB ($s = 4.2\%$). En el 10% de los casos el error relativo resultó ser superior al 20% para NT y TMT y superior al 10% para LB. Todos los resultados presentados en este artículo se obtuvieron de manera análoga y consistente para cada una de las cuatro zonas analizadas.

CONCLUSIONES

Los filtros de mayoría producen patrones más fragmentados que los obtenidos directamente de los sensores remotos. Para mejorar la comparabilidad entre imágenes de satélite con distintas resoluciones espaciales es necesario considerar la función de extensión del sensor o aplicar una deconvolución a la imagen de satélite antes de su clasificación. Las leyes potenciales permiten predecir la variación con la resolución espacial de diversos índices de fragmentación, haciéndolos comparables con unos márgenes de error relativamente bajos. El índice de cohesión presenta un comportamiento deficiente que permite asignar un valor arbitrariamente del mismo a un paisaje mediante el simple remuestreo de los datos espaciales a resoluciones más finas. El índice de división resulta ser el índice más robusto para la comparación de la fragmentación entre datos con distinta resolución espacial.

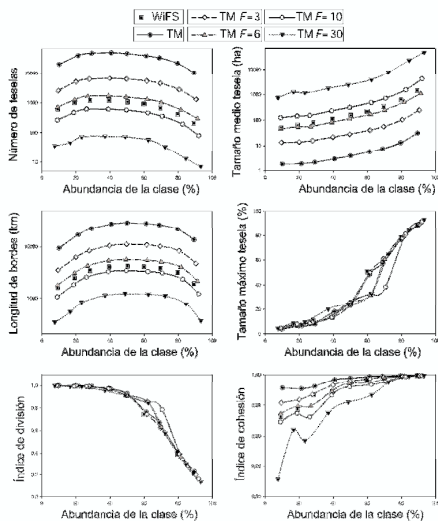


Figura 1.- Valores de los índices en función de la abundancia de la clase para la zona 2 y la clase de alto NDVI. Se incluyen los valores calculados directamente sobre los patrones TM y WiFS, así como los TM agregados a distintas resoluciones mediante filtros de mayoría. Los valores de NT, TMT y LB se muestran en escala logarítmica.

BIBLIOGRAFÍA

Benson, B.J. y MacKenzie, M.D. 1995. Effects of sensor spatial resolution on landscape structure parameters. *Landscape Ecology* 10: 13-120.

Breaker, L.C. 1990. Estimating and removing sensor-induced correlation from Advanced Very

High Resolution Radiometer satellite data. *Journal of Geophysical Research* 95: 9701-9711.

Chuvieco, E. 1999. Measuring changes in landscape pattern from satellite images: short-term effects of fire on spatial diversity. *International Journal of Remote Sensing* 20: 2331-2346.

Cracknell, A.P. 1998. Synergy in remote sensing - what's in a pixel? *International Journal of Remote Sensing* 19: 2025-2047.

Frohn, R.C. 1998. *Remote sensing for landscape ecology: new metric indicators for monitoring, modeling and assessment of ecosystems*. CRC-Lewis Publishers. Boca Raton, Florida.

Huang, C., Townshend, J.R.G., Liang S., Kalluri, S.N.V. y DeFries, R.S. 2002. Impact of sensor's point spread function on land cover characterization: assessment and deconvolution. *Remote Sensing of Environment*. 2002: 203-212.

Imbernon, J. y Branthomme, A. 2001. Characterization of landscape patterns of deforestation in tropical rain forests. *International Journal of Remote Sensing* 22: 1753-1765.

Korvin, G. 1992. *Fractal models in the earth sciences*. Elsevier Science Publishers. Amsterdam.

Ministerio de Medio Ambiente. 2003. *Tercer Inventario Forestal Nacional*. DGONA. Madrid.

Saura, S. 2001. *Influencia de la escala en la configuración del paisaje: estudio mediante un nuevo método de simulación espacial, imágenes de satélite y cartografías temáticas*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

Saura, S. y Martínez-Millán, J. 2001. Sensitivity of landscape pattern metrics to map spatial extent. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 67: 1027-1036.

Saura, S. 2002. Effects of minimum mapping unit on land cover data spatial configuration and composition. *International Journal of Remote Sensing* 23: 4853-4880.

Saura, S. 2003. The effect of spatial resolution on selected landscape pattern fragmentation indices. Enviado a *Landscape Ecology* (en revisión).

Schumaker, N.H. 1996. Using landscape indices to predict habitat connectivity. *Ecology* 77: 1210-1225.

Wickham, J.D. y Riitters, K.H. 1995. Sensitivity of landscape metrics to pixel size. *International Journal of Remote Sensing*. 16: 3585-3594.

Wu, J. y R. Hobbs. 2002. Key issues and research priorities in landscape ecology: an idiosyncratic synthesis. *Landscape Ecology* 17: 355-365.

Wu, J., Shen, W., Sun, W. y Tueller, P.T. 2002. Empirical patterns of the effects of changing scale on landscape metrics. *Landscape Ecology* (aceptado para publicación).