

CASO PRÁCTICO

Descripción y cálculo de índices de fragmentación urbana: Herramienta *IndiFrag*

Sapena, M.*, Ruiz, L. A.

Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT). Universitat Politècnica de València. Campus de Vera. Camino de Vera s/n, 46022 - Valencia, España.

Resumen: En este trabajo se estudia el concepto de fragmentación del paisaje y su análisis a través de técnicas de teledetección y SIG. Se presenta una nueva herramienta, llamada *IndiFrag*, que calcula índices y variables que describen de forma cuantitativa el nivel de fragmentación y la distribución espacial de los usos del suelo provenientes de mapas de coberturas en formato vectorial. La herramienta compila un gran número de índices de fragmentación y permite su cálculo para objetos cartográficos según varios niveles de jerarquía. Los índices están divididos en cinco grupos en función de los atributos que describen: área y perímetro, forma, agregación, diversidad y contraste. Esta herramienta se aplica de forma práctica a datos de usos del suelo de la ciudad de Valencia derivados de una clasificación orientada a objetos, generando mapas de índices de fragmentación a nivel de barrio, obteniendo así los resultados de la fragmentación urbana de los barrios de Valencia. El desarrollo de *IndiFrag* constituye un paso preliminar para la creación de una metodología que cuantifique la evolución de las zonas urbanas a lo largo del tiempo desde el punto de vista de su fragmentación y de la relación de esta propiedad con determinadas variables geográficas.

Palabras clave: *IndiFrag*, índices de fragmentación, fragmentación urbana, expansión urbana, clasificación, teledetección.

Description and extraction of urban fragmentation indices: The *Indifrag* tool

Abstract: The concept of land fragmentation is studied and analysed in this paper by means of remote sensing and GIS techniques. A new tool is presented, *IndiFrag*, which calculates a variety of metrics to characterise landscape fragmentation using as input data LULC classification data in vector format. The tool includes an exhaustive set of fragmentation indices, and allows its application to cartographic objects at several hierarchical levels. These indices are divided into five groups according to the measured properties: area and perimeter, shape, aggregation, diversity, and contrast. The tool and methods are applied to data derived from an object-based classification and neighbourhood boundaries from the city of Valencia, in order to assess the urban use fragmentation. Urban fragmentation indices and maps of the Valencian administrative neighbourhoods are generated and interpreted. The development of *IndiFrag* constitutes a preliminary step to create a methodology that quantifies urban evolution through the time in terms of fragmentation, as well as to explore the relations from a geographical perspective.

Key words: *IndiFrag*, fragmentation indices, urban fragmentation, urban sprawl, classification, LULC, remote sensing.

* Autor para la correspondencia: marsamol@topo.upv.es

1. Introducción

La fragmentación del paisaje hace referencia al proceso por el cual los usos del suelo se segregan espacialmente, variando las relaciones de continuidad dentro de cada uso y entre los diferentes usos existentes. Este fenómeno tiene lugar fundamentalmente como consecuencia de procesos antrópicos, aunque también puede deberse a desastres naturales y puede darse en entornos naturales, rurales, urbanos o mixtos, afectando al medio ambiente, al paisaje, o a la calidad de vida urbana (Wei y Zhang, 2012).

La fragmentación urbana permite conocer e identificar las características y patrones de crecimiento urbano y los impactos que tienen sobre el territorio. Su estudio permite caracterizar las transformaciones más evidentes de las áreas urbanas y su evolución en el tiempo (Salinas, 2009). El concepto de expansión urbana lo define la Comisión Europea (2012) como el desarrollo hacia las áreas suburbanas y rurales.

El estudio de la fragmentación se ha abordado con diferentes objetivos, debido a su interés en estudios ecológicos, socio-económicos y en la gestión del territorio, y su análisis puede proporcionar las claves para un desarrollo territorial más equilibrado (Salinas, 2009). Así, se ha analizado la fragmentación debida al impacto humano sobre el medio ambiente, por considerarse una de las principales razones de la extinción de especies (Jaeger, 2000). Herold *et al.* (2002) describen la estructura de los usos urbanos y los cambios en la cobertura como resultado del crecimiento urbano. Irwin y Bockstael (2007) proponen un conjunto de métricas de patrones que capturan diferentes dimensiones de la fragmentación con el objetivo de estudiar la dinámica y distribución espacial de los usos del suelo. Escolano (2009) caracterizó y clasificó las distribuciones espaciales de los usos del suelo para identificar patrones, modelar su intensidad e interpretar los cambios. Astiaso *et al.* (2013), por su parte, cuantificaron los niveles de fragmentación de los hábitats naturales debido a la presencia de asentamientos urbanos en los parques nacionales.

Entre los diversos programas que permiten calcular métricas relacionadas con la heterogeneidad y fragmentación del paisaje a partir de mapas de coberturas de usos del suelo se encuentran

FRAGSTATS v4 (McGarigal *et al.*, 2012) y *LFT v2.0* (CLEAR, 2009). El primero, considerado el programa referente actual (MacLean y Congalton, 2013), permite el cálculo automático de índices de fragmentación mediante información de los usos del suelo en formato *raster*, mientras que el segundo muestra visualmente los niveles de fragmentación, sin ofrecer valores numéricos.

La creciente disponibilidad de imágenes de satélite de alta resolución espacial y el desarrollo de técnicas de análisis de imágenes basado en objetos (*Object-Based Image Analysis*, OBIA), permite superar algunos inconvenientes asociados a las clasificaciones por píxel basadas en la respuesta espectral, al permitir incluir atributos espectrales, espaciales, contextuales, morfológicos y temporales (Cánovas, 2012). Todo ello favorece la disponibilidad actual de datos de usos y coberturas de suelo (*Land-Use Land-Cover*, LULC) de alta resolución. Un buen ejemplo es el Atlas Urbano Europeo, que forma parte de la componente local de *Copernicus Land Monitoring Services*, creado con el objetivo de proporcionar datos espaciales a escala europea y facilitar evidencias para el desarrollo de políticas de decisión. Si bien se encuentra en fase de desarrollo, comienzan a estar disponibles datos en formato vectorial sobre LULC en 2006 y 2012 de las ciudades europeas que sobrepasan un cierto número de habitantes (100.000 para 2006 y 50.000 para 2012).

Al trabajar con datos vectoriales, la limitación de escala inherente al formato *raster*, así como la alta dependencia de los resultados respecto al tamaño del píxel, desaparecen. El formato vectorial permite operar con relaciones topológicas, de modo que no se pierde el significado de objeto ni la relación entre objetos contiguos de una misma clase, siendo más fiel a la realidad y, al mismo tiempo, facilitando la interpretación de los resultados mediante la generación de mapas de variables o índices de forma directa y sencilla.

Así, surge la necesidad de desarrollar programas capaces de cuantificar la fragmentación del paisaje con datos en formato vectorial, creándose nuevas herramientas como *V-LATE* (Lang y Tiede, 2003), *Patch Analyst 5.1* (Rempel *et al.*, 2012) y *PolyFrag* (MacLean y Congalton, 2013), que trabajan con mapas de coberturas en formato vectorial y operan desde el programa *ArcGis* (ESRI®).

Las herramientas *V-LATE* y *Patch Analyst 5.1* poseen una capacidad más limitada para cuantificar la fragmentación del paisaje que *FRAGSTATS* (MacLean y Congalton, 2013). A pesar de implementar índices similares a los de *FRAGSTATS*, *PolyFrag* queda limitado en cuanto al análisis de la fragmentación urbana, puesto que no permite realizar el cálculo en diferentes zonas de interés o polígonos al mismo tiempo y, además, fusiona los polígonos contiguos de cada clase, perdiendo así el significado de objeto o entidad urbana.

En este estudio se revisan y describen indicadores cuantitativos de fragmentación urbana a partir de los usos del suelo provenientes de procesos de clasificación de imágenes u otros métodos, y se presenta una nueva herramienta, *IndiFrag*, que compila un gran número de índices de fragmentación y permite su cálculo para objetos cartográficos según varios niveles de complejidad o jerarquía. Finalmente, se aplica de forma práctica a datos de usos del suelo de la ciudad de Valencia derivados de una clasificación orientada a objetos, generando mapas de índices de fragmentación a nivel de barrio. El desarrollo de esta herramienta, si bien puede aplicarse sobre diversos ámbitos paisajísticos, constituye un paso preliminar para la creación de una metodología que cuantifique la evolución de las zonas urbanas a lo largo del tiempo desde el punto de vista de variables geográficas y de su fragmentación.

2. Descripción del software

La aplicación *IndiFrag* es una herramienta *ToolBox* para *ArcGis* desarrollada a partir de la compilación de un conjunto exhaustivo de índices

de fragmentación del paisaje, que permite automatizar su cálculo de forma completa.

Los índices se han clasificado por un lado en función de su nivel jerárquico y por otro atendiendo al tipo de atributos o propiedades que describen. En primer lugar, se agrupan en tres niveles de menor a mayor jerarquía: objeto, clase y súper-objeto. Los índices a nivel de objeto (Figura 1, A) describen las características propias de cada objeto y se calculan de forma independiente. Un objeto típico sería, por ejemplo, una parcela catastral o un bloque urbano. En el nivel de clase (Figura 1, B) se agrupan los índices que describen un conjunto de objetos de la misma clase, por ejemplo las relaciones entre las parcelas catastrales que presentan un mismo uso. Por último, los índices a nivel de súper-objeto (Figura 1, C) describen relaciones entre objetos de varias clases en un ámbito más amplio, como puede ser un límite administrativo de rango superior (barrio, distrito, etc.).

En segundo lugar, pueden dividirse en los siguientes grupos en función del tipo de propiedad que describen: (1) área y perímetro, relacionados con el tamaño y contorno de los objetos; (2) forma, son medidas que aportan información acerca de la morfología de los objetos; (3) agregación, describen la distribución espacial de los elementos del paisaje; (4) diversidad, índices relativos a la riqueza o variedad de clases y a la uniformidad; y (5) contraste, que cuantifican las adyacencias entre los objetos de distintas clases. De esta forma, un índice siempre pertenecerá a un único grupo en relación a las propiedades que mide, sin embargo, un mismo índice puede ser calculado en distintos niveles jerárquicos.



Figura 1. Niveles jerárquicos del cálculo de los índices de fragmentación. A: nivel de objeto, B: nivel de clase y C: nivel de súper-objeto.

La Tabla 1 recoge una breve descripción de los índices implementados, que han sido seleccionados de una recopilación inicial de métricas relacionadas con la fragmentación del paisaje siguiendo un doble criterio de (i) idoneidad para el análisis urbano y (ii) reducción de redundancias con el fin de minimizar efectos de colinealidad en su aplicación. Los índices aparecen clasificados en función del grupo de atributos que describen (área y perímetro, forma, agregación, diversidad y contraste). Para cada índice se indica el nombre y su

abreviatura, a la que se hará alusión en los resultados, fórmula, variables utilizadas, referencias a las citas originales, una breve descripción del índice y los niveles jerárquicos en los que se puede aplicar cada índice.

IndiFrag consiste en una caja de herramientas de secuencias de comandos (*toolbox*), extensión del software *ArcGis*, que está compuesta por dos conjuntos de herramientas (*toolsets*) que contienen las secuencias de comandos (*scripts*) con las

Tabla 1. Índices de Fragmentación Urbana recopilados en la aplicación *IndiFrag*.

Fórmula	Variables	Referencia	Descripción	Nivel*
Área y Perímetro				
Índice de Frag. Urbana Pond. $\overline{IFUP}_i = \frac{\sum_{i=1}^n (IFU_i \cdot A_i)}{\sum_{i=1}^n (A_i)}$	A_i = área SO (m ²) $IFU_i = \left(\frac{\sum_{j=1}^{n_i} (L_{max_j} \cdot A_o \cdot O_i)}{A_i} \right)$ de SO L_{max_i} = long. máx. Obj i en SO A_o = área objeto (m ²) O_i = coef.obstrucción	(Astiaso <i>et al.</i> , 2013) (Romano y Tamburini, 2006)	Coefficientes de obstrucción $O_i=1$: Industrial, viário. $O_i=0,8$: Urbano cont. $O_i=0,6$: Urbano disc. $O_i=0,4$: Zona verde	SO
Densidad urbana $DU = \frac{A_u}{A_t} (\%)$	A_u = área urbanizada(m ²) A_t =área SO(m ²)	(Colaninno <i>et al.</i> , 2011) (Romano <i>et al.</i> , 2010)	Ratio entre la superficie urbanizada y la superficie del SO analizado	SO
Índice Leapfrog Bruto $LPF = \frac{A_{out_i}}{A_c}$	A_{out_i} = área objetos aislados clase i (m ²) A_c = área clase i (m ²)	(Frenkel y Ashkenazi, 2008)	Leapfrog se dice a las construcciones urbanas lejos del centro urbano, dispersas	C
Tamaño Medio del Objeto $TM_{ij} = \sum_{j=1}^m \left(\frac{A_{cij}}{n_{ij}} \right)$	A_{cij} = área clase j en SO i (m ²) n_{ij} =n°objetos en clase j en SO i	(McGarigal <i>et al.</i> , 2012) (Frenkel y Ashkenazi,2008) (Irwin y Bockstael, 2007)	Mide la tendencia media un objeto en un SO	C, SO
Densidad de Borde $DB = \frac{\sum P_o}{\sum A_T} (m/m^2)$	P_o =perímetro objeto A_T =área SO (incluyendo el fondo) (m ²)	(McGarigal <i>et al.</i> , 2012) (Herold <i>et al.</i> , 2002)	Estandariza el borde por unidad de superficie, facilita las comparaciones entre las clases	C, SO
Dimensión de Borde $\ln(A_o) = \ln(C) + \frac{2}{Dim_B} \cdot \ln(P_o)$	A_o = área del objeto(m ²) P_o =perím. del objeto(m) C = coeficiente constante	(Wu <i>et al.</i> , 2013)	Dimensión Fractal. Indica la forma de borde simple o compleja	O
Forma				
Ratio Medio del Perímetro-Área $RMPA = \frac{\sum_i \left(\frac{P_{oik}}{A_{oik}} \right)}{n_k}$	P_{oik} = perímetro objeto i clase k (m) A_{oik} =área objeto i clase k (m ²) n_k =n° objetos clase k	(McGarigal <i>et al.</i> , 2012) (Irwin y Bockstael, 2007)	El resultado es altamente dependiente del tamaño de los objetos	O,C,SO
Índice de Forma $IF = \frac{0.25 \cdot P_{o,ct}}{\sqrt{A_{o,ct}}}$	$P_{o,ct}$ =perímetro objeto, clase o SO (m) $A_{o,ct}$ = área objeto, clase, o SO (m ²)	(McGarigal <i>et al.</i> , 2012) (Frenkel y Ashkenazi,2008) (Fang <i>et al.</i> , 2007)	Es la medida más simple y directa de la complejidad de la forma	O, C, SO
Dimensión Fractal $DF = \frac{2 \cdot \ln(0.25 \cdot P_o)}{\ln(A_o)}$	P_o = perímetro del objeto i (m) A_o = área del objeto i (m ²)	(McGarigal <i>et al.</i> , 2012) (Colaninno <i>et al.</i> , 2011) (Frenkel y Ashkenazi, 2008) (Gong <i>et al.</i> , 2013) (Herold <i>et al.</i> , 2002)	Supera la limitación de medir el ratio área-perímetro como medida de complejidad de la forma	O, C, SO
Dimensión Fractal Ponderada del Área Media del Objeto $DFP = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{2 \cdot \ln(0.25 \cdot P_o)}{\ln(A_o)} \right) \cdot \left(\frac{A_o}{\sum_{i=1}^n A_o} \right) \right]$	P_o = perímetro del objeto i (m) A_o =área del objeto i (m ²)	(Gong <i>et al.</i> , 2013) (McGarigal <i>et al.</i> , 2012) (Herold <i>et al.</i> , 2002)	Muestra la forma del objeto	C

Agregación

Densidad de Objeto	$A_T = \text{área SO (m}^2\text{)} (\text{incluyendo el fondo})$ $n_i = n^\circ \text{ de objetos en la clase } i$	(Gong <i>et al.</i> , 2013) (McGarigal <i>et al.</i> , 2012) (Irwin y Bockstael, 2007) (Herold <i>et al.</i> , 2002)	Calcula el número de objetos por cada 100 ha	C, SO
Distancia estándar ponderada	$A_o = \text{área del objeto } i \text{ (m}^2\text{)}$ $A_c = \text{área clase (m}^2\text{)}$ $x_i, y_i = \text{coord. centroide objeto } i \text{ (m)}$ $\bar{x}, \bar{y} = \text{coord. centro medio de los objetos}$	(Colaninno <i>et al.</i> , 2011)	Es dependiente de las distancias entre centroides y tamaño de los objetos	C, SO
Distancia Euclídea Media del Vecino Más Próximo	$h_i = \text{dist. objeto } i \text{ al objeto más próximo (de eje a eje) (m)}$ $n = n^\circ \text{ objetos}$	(Gong <i>et al.</i> , 2013) (McGarigal <i>et al.</i> , 2012)	Muestra la distribución de los objetos dentro de una misma clase o SO, mide distancias entre objetos.	C
Tamaño Efectivo de Malla	$n = n^\circ \text{ de objetos}$ $A_o = \text{área objeto } i \text{ (m}^2\text{)}$ $A_t = \text{área SO (incluyendo el fondo) (m}^2\text{)}$	(McGarigal <i>et al.</i> , 2012) (EEA, 2011) (Jaeger, 2000)	Probabilidad de que dos puntos aleatorios en un área estén conectados	C, SO
Grado de Coherencia	$n = n^\circ \text{ objetos}$ $A_o = \text{área objeto } i \text{ de clase } j \text{ (m}^2\text{)}$ $A_t = \text{área SO (incluyendo el fondo) (m}^2\text{)}$	(McGarigal <i>et al.</i> , 2012) (Jaeger, 2000)	Probabilidad de que dos puntos en dos áreas de la misma región se encuentren	C, SO
Índice de Separación	$n = n^\circ \text{ de objetos}$ $A_o = \text{área objeto } i \text{ clase } j \text{ (m}^2\text{)}$ $A_t = \text{área SO (incluyendo el fondo) (m}^2\text{)}$	(McGarigal <i>et al.</i> , 2012) (Jaeger, 2000)	Número de malla efectiva, divide la región en objetos con un tamaño constante	C, SO
Dimensión del Radio	$R = \text{radio del centro (m)}$ $A_c(r) = \text{área de la clase dentro del círculo de radio } r \text{ (m}^2\text{)}$ $C = \text{coeficiente constante}$	(Wu <i>et al.</i> , 2013)	Dimensión Fractal. Analiza el patrón espacial de cada uso	C
Cohesión	$P_o = \text{perímetro del objeto (m)}$ $A_o = \text{área del objeto (m}^2\text{)}$ $A_t = \text{área total de los objetos en el SO (m}^2\text{)}$	(McGarigal <i>et al.</i> , 2012) (MacLean y Congalton, 2013)	Mide la conectividad de cada clase o SO, a través de la distribución de los objetos	C, SO

Diversidad

Diversidad de Shannon	$P_i = \text{porción del SO ocupada por la clase } i = (A_c/A_t)$ $A_c = \text{área clase } i \text{ (m}^2\text{)}$ $A_t = \text{área SO (m}^2\text{)}$	(McGarigal <i>et al.</i> , 2012) (Colaninno <i>et al.</i> , 2011)	Representa la cantidad de información por objeto	SO
Uniformidad de Shannon	$P_i = \text{porción del SO ocupada por la clase } i = (A_c/A_t)$ $n = n^\circ \text{ de clases}$	(McGarigal <i>et al.</i> , 2012) (Romano <i>et al.</i> , 2010)	Nº de polígonos que forman el área urbana, ponderado por su propia dimensión	SO
Índice de Fragmentación Funcional Relativa	$R_v = n^\circ \text{ total de áreas funcionales (usos)}$ $N = n^\circ \text{ áreas funcionales dentro del SO}$	(Marinescu y Avram, 2012)	Calcula el nivel de fragmentación dentro del perímetro en relación con las áreas funcionales (clases)	SO
Índice de Fragmentación Funcional Absoluta	$P_c = \text{perímetro del área funcional } i \text{ (m)}$ $V_f = \text{perímetro SO (m)}$	(Marinescu y Avram, 2012)	Calcula el nivel de integración funcional y estructural del perímetro	SO
Densidad-Diversidad	$k = n^\circ \text{ clases}$ $A_{c_i,k} = \text{área clase } k \text{ en SO } i \text{ (m}^2\text{)}$ $\max(A_{c_i,k}) = \text{área de la clase con mayor área (m}^2\text{)}$	(Escolano, 2009)	Se elimina el efecto de escala de la diversidad añadiendo el dato del volumen	C, SO

Contraste

Ratio Contraste de Bordes	$e_{kj} = \text{long. borde entre objetos de clase } k \text{ y } j \text{ (m)}$ $e_{kk} = \text{long. borde entre objetos de la misma clase (m)}$	(McGarigal <i>et al.</i> , 2012) (Irwin y Bockstael, 2007)	Todos los bordes no son iguales, se crea para medir el contraste de los bordes de los objetos	O, C, SO
----------------------------------	---	---	---	----------

* Los niveles a los que pueden ser aplicados los índices son: O = objeto, C = clase y SO = súper-objeto.

operaciones de geoprocetamiento necesarias, y se ha desarrollado en lenguaje *Python*. El usuario introduce los datos de entrada y selecciona los índices que desea, que se calculan de forma automática.

El programa no requiere instalación, ya que se accede directamente desde *ArcCatalog* o *ArcToolbox*. Sin embargo, para poder ejecutar la herramienta es necesario tener instalada la versión 10.1 de *ArcGis* y la versión 2.7 de *Python* o superiores. El símbolo decimal configurado en el sistema operativo debe ser el punto.

A diferencia de otras aplicaciones para el cálculo de índices de fragmentación ya mencionadas, *IndiFrag* permite aplicar análisis y cálculos en distintas zonas, recintos o polígonos de interés

en una misma ejecución. Así, por ejemplo, en el ámbito urbano se pueden calcular índices de fragmentación para cada barrio, distrito, unidad censal, etc. (súper-objetos) de forma simultánea, pudiendo así realizar comparaciones entre las diferentes zonas, estudiar evoluciones o estimar modelos de variables socio-económicas a partir de las métricas de un conjunto de súper-objetos en un área metropolitana.

Los datos de entrada en *IndiFrag* son dos capas en formato vectorial. En primer lugar, la capa que contiene a los objetos cartográficos clasificados con entidad mínima (Figura 2, A), a partir de los cuales se calcularán las métricas de fragmentación. En segundo lugar, la capa con los súper-objetos que definen los límites que contienen a los diferentes objetos de la capa anterior (Figura 2, B).

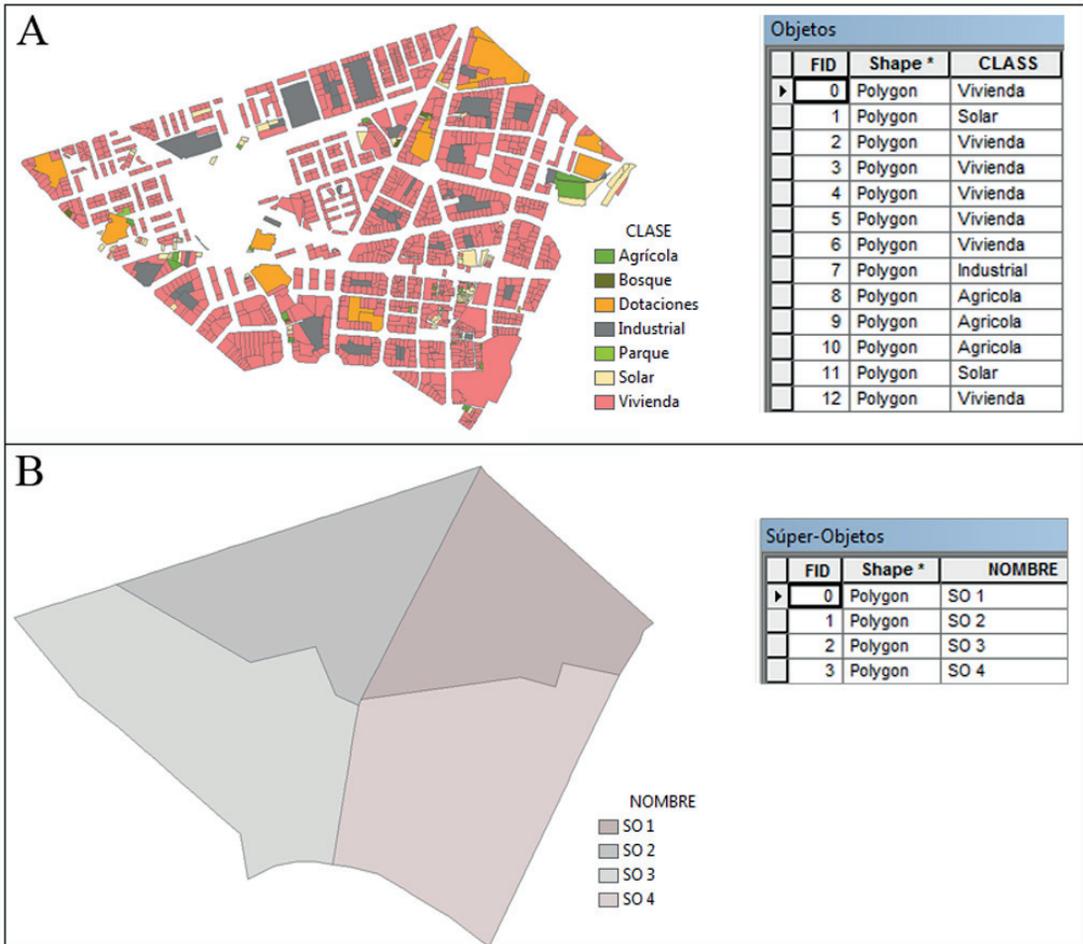


Figura 2. Datos de entrada en *IndiFrag*. A: capa con los objetos clasificados (parcelas catastrales) y B: capa con los súper-objetos (barrios). Ambas con la tabla de atributos asociada. Para la interpretación de los colores consultar edición digital disponible en <http://dx.doi.org/10.4995/raet.2015.3476>.

En el caso de que la capa con los súper-objetos no se introduzca en el programa como dato de entrada, se considera que todos los objetos pertenecen al mismo súper-objeto, cuyo límite se forma mediante la fusión de todos los objetos.

Excepcionalmente, si se selecciona y calcula el índice de Dimensión del Radio, se necesita una capa puntual con las coordenadas de un punto céntrico. Por ejemplo, en el ámbito urbano podría ser el ayuntamiento de una ciudad, o genéricamente el centro geométrico de los objetos. El programa calcula la distribución espacial radial de las clases respecto al punto dado.

En cuanto a la salida de los resultados, los valores de los índices calculados de cada objeto y de cada clase (el nivel de clase de los distintos súper-objetos se calcula por separado) se almacenan en la capa de entrada con los objetos. En cambio, los resultados a nivel de súper-objeto se almacenan

en la capa de los súper-objetos. De este modo la interpretación visual de los resultados resulta más sencilla. Así mismo, opcionalmente los resultados pueden almacenarse en un fichero de texto con un resumen de los datos de entrada utilizados y los resultados obtenidos.

Al tratarse de una caja de herramientas, su uso resulta sencillo incluso para un usuario sin conocimientos de programación. Puede ejecutarse de dos formas: (1) el módulo completo, calculándose automáticamente todos los índices descritos en la Tabla 1 (Análisis Completo); (2) si sólo se desea calcular algunos índices de forma selectiva, se puede ejecutar individualmente cada grupo de índices en el módulo dividido por grupos (Análisis por Grupos), donde el usuario puede elegir los índices específicos que desee calcular (Figura 3, E). Si no se selecciona ningún índice, *IndiFrag* calcula por defecto una serie de campos comunes a todas las opciones. En ambos módulos, el programa

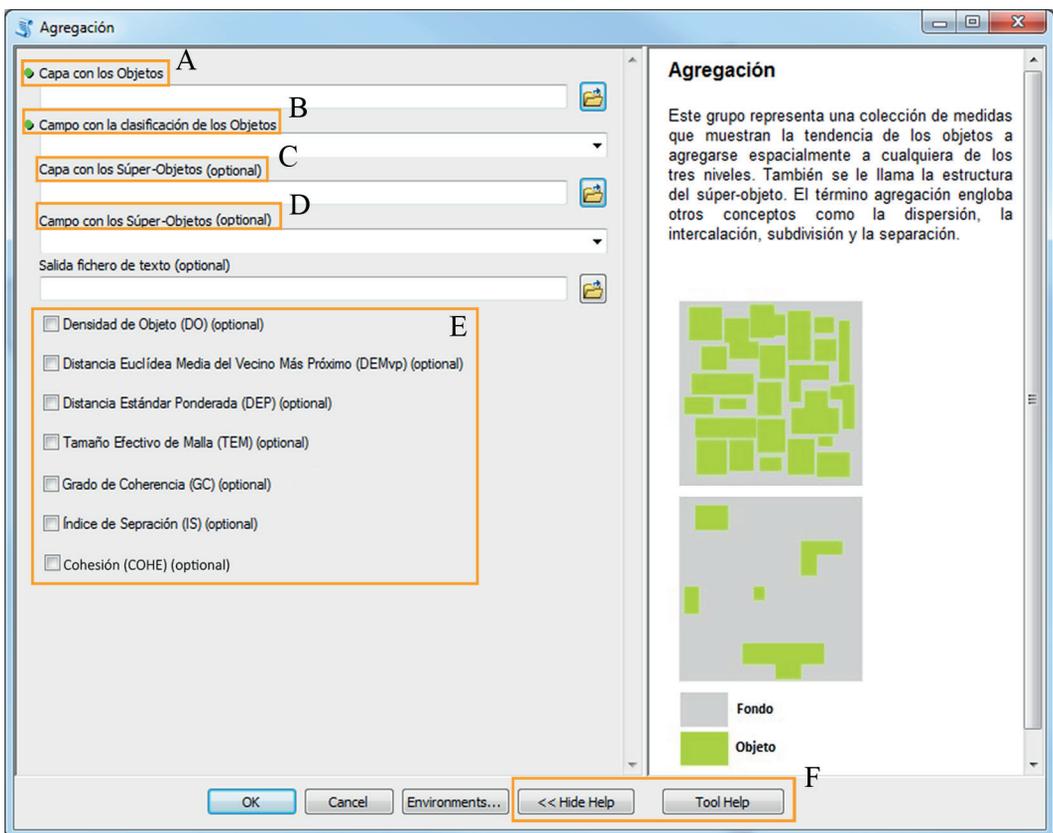


Figura 3. Interfaz del grupo de Agregación (módulo de Análisis por Grupos). A: capa con los objetos, B: campo que contiene la clasificación de los objetos, C: capa con los súper-objetos, D: campo con el nombre o identificador del súper-objeto, E: lista de índices que se pueden calcular y F: información adicional de cada punto anterior.

solicita obligatoriamente la capa con los objetos (Figura 3, A) y el nombre del campo que contiene la clasificación (Figura 3, B). Si bien no es obligatorio, es aconsejable también introducir la capa con los límites de los súper-objetos (Figura 3, C) y el nombre del campo que los diferencia (Figura 3, D). Cada registro de entrada o salida de datos tiene su propia pantalla de ayuda, donde se especifica el tipo de dato, requisitos o información adicional de cada opción (Figura 3, F).

El programa *IndiFrag* dispone de un manual de ayuda que describe su uso. Para su descarga se invita al lector a ponerse en contacto con los autores.

3. Aplicación de los índices de fragmentación a la ciudad de Valencia

Se han aplicado los índices de fragmentación generados con *IndiFrag* a partir de datos provenientes de la ciudad de Valencia. Este núcleo metropolitano ha experimentado innumerables variaciones urbanísticas desde su fundación (Llopis y

Perdigón, 2012). A lo largo de su historia se han producido sucesivas ampliaciones del recinto urbano como respuesta al crecimiento demográfico y a la excesiva densificación de las zonas centrales, materializadas a través de proyectos de ensanche y reforma interior de la ciudad. Estas actuaciones han generado un conjunto de tipologías urbanas bien definidas estructuralmente.

Los datos de partida utilizados se obtuvieron a partir de una clasificación multinivel mediante técnicas de clasificación por objetos, tal y como se describe en Hermosilla *et al.* (2010 y 2012a). Para ello, se emplearon imágenes PNOA de 2008 de 0,5 m/píxel, datos LiDAR de 2009 y cartografía vectorial proveniente del Catastro (DGC) con los límites de las parcelas catastrales a escala 1:1.000. Como resultado se obtuvo una clasificación por parcelas (objetos) (Hermosilla *et al.*, 2012b) con diecisiete usos de suelo, que posteriormente se redujeron a siete para la simplificación y coherencia del análisis de fragmentación. Además, se dispone de los límites administrativos de los 87 barrios de

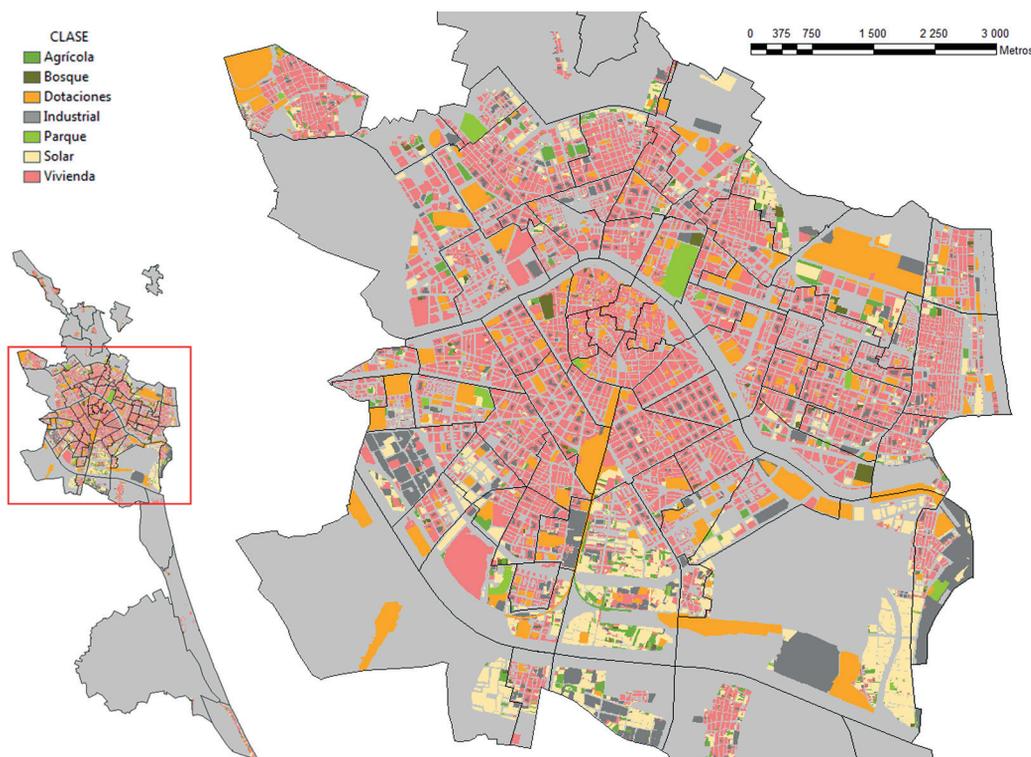


Figura 4. Clasificación de la ciudad de Valencia generada a partir de ortoimágenes PNOA y datos LiDAR mediante técnicas de clasificación orientada a objetos. Modificada de Hermosilla *et al.* (2012b). Para la interpretación de los colores consultar edición digital disponible en <http://dx.doi.org/10.4995/raet.2015.3476>.

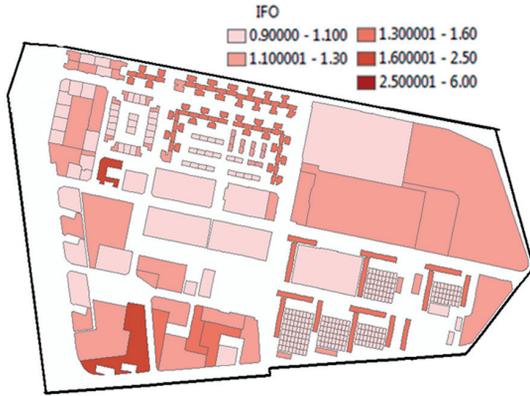


Figura 5. Ejemplo de los valores del IFO para las parcelas catastrales del barrio de Tres Forques.

Valencia (súper-objetos). El resultado de la clasificación en siete usos del suelo aparece en la Figura 4.

A partir de ella se han calculado todos los índices de las distintas jerarquías recogidos en la Tabla 1. Como resultado, cada objeto tiene asociado su valor para cada índice, ya sea a nivel de objeto, de clase o de súper-objeto. Como ejemplo, a continuación se analizan algunos de los índices obtenidos sobre los datos de Valencia.

El Índice de Forma (IF), calculado a los tres niveles, cuantifica la complejidad de la forma de un objeto comparándolo con la forma estándar de un cuadrado del mismo tamaño, su valor es adimensional y aumenta a medida que aumenta su complejidad. Como ejemplo, la Figura 5 muestra el Índice de Forma por Objeto (IFO) de todas las parcelas catastrales contenidas en el barrio de Tres Forques. Como puede apreciarse, el IFO aumenta

cuanto más irregular es el objeto, independientemente de su clase.

Continuando el análisis en un nivel jerárquico superior, a nivel de clase se observa que en dicho barrio las clases parque, solar e industrial son las que presentan objetos con formas más irregulares, mientras que la clase vivienda tiene un Índice de Forma (IFCI) muy bajo, lo cual revela su proximidad a la forma del cuadrado (Figura 6).

Por otro lado, estudiando los índices a nivel de súper-objeto, el resultado obtenido es un mapa de barrios para cada uno de los índices de fragmentación calculados sobre los objetos que lo forman. Cada barrio presenta un valor para cada índice en cuestión, obteniéndose una representación global de la distribución espacial de cada atributo de fragmentación. Así, se puede observar en la Figura 7 que los barrios residenciales, donde la mayoría de los objetos son de vivienda, tienen un Índice de Forma a nivel de Súper-Objeto (IFSO) bajo (Figura 7, A), una Densidad Urbana (DU) elevada (Figura 7, B), y el índice de Diversidad de Shannon (DSHAN) bajo (Figura 7, C), puesto que se da menos variedad de clases del tipo agrícola, industrial o solar. Además, puede apreciarse que el Ratio Contraste de Bordes a nivel de Súper-Objeto (RCBSO) varía en función de la disposición de los objetos entre clases dentro de cada barrio (Figura 7, D).

Como ejemplo de aplicación de los índices que se han obtenido anteriormente con la herramienta *IndiFrag*, se ha realizado un análisis clúster mediante el algoritmo de las *K-Medias*. Para ello, se ha seleccionado un conjunto de índices aplicados



Figura 6. Ejemplo de los Índices de Forma de Clase (IFCI) en el barrio Tres Forques. Agrícola= 1,01; bosque= 1,05; vivienda= 1,08; dotaciones= 1,12; parque= 1,18; industrial= 1,24; solar= 1,27. A la izquierda se representan las clases de cada objeto y a la derecha los valores del IFCI, siendo iguales para todos los objetos de una misma clase.

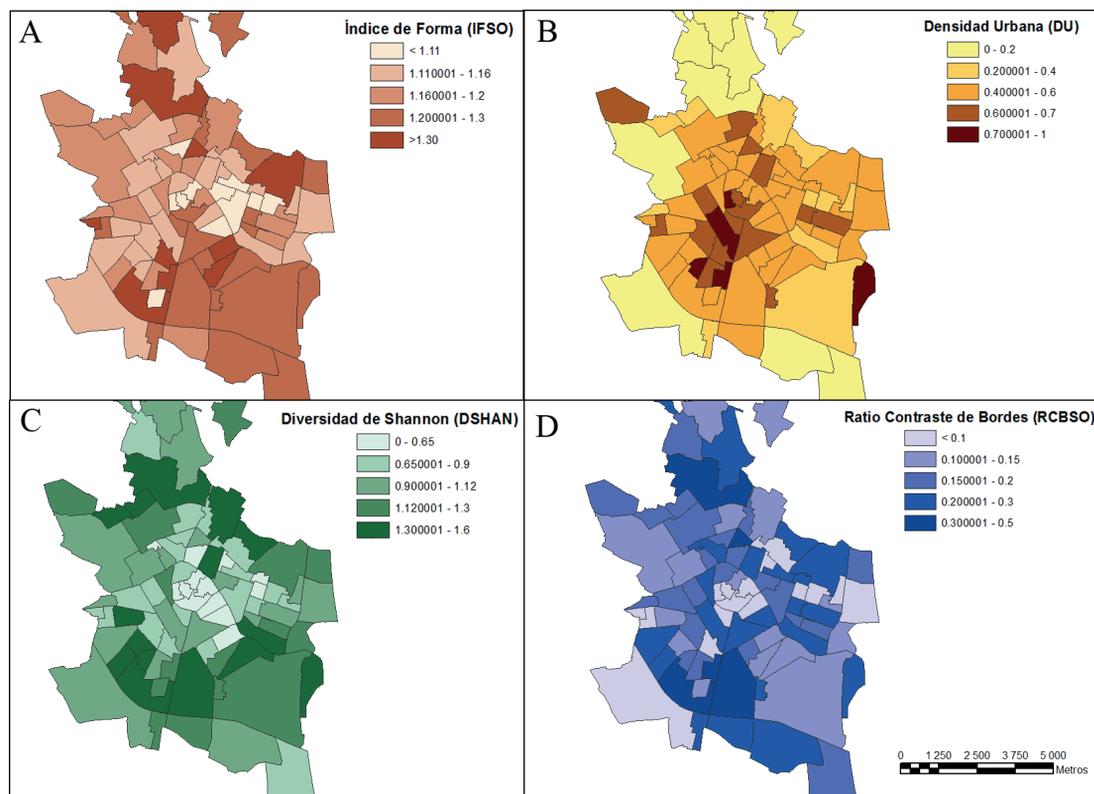


Figura 7. Ejemplo de algunos índices de fragmentación a nivel de súper-objeto en los barrios de Valencia, como resultado gráfico de la aplicación *IndiFrag*. Se representan intervalos de los valores de cada índice por barrio. Los índices representados pertenecen a los grupos de A: Forma, B: Área y Perímetro, C: Diversidad y D: Contraste.

(i) a nivel de súper-objeto, y (ii) a nivel de la clase vivienda dentro de cada súper-objeto (barrio).

El método de *clustering* de las *K-Medias* agrupa los objetos de forma iterativa en función de las distancias al centroide de cada grupo o clúster. Como resultado se obtuvo una clasificación no supervisada de los barrios de Valencia en cuatro clústers (Figura 8), seleccionando previamente un conjunto de variables que describen cuatro grupos de propiedades diferentes: forma y tamaño (Densidad Urbana (DU), Tamaño Medio (TM) e Índice de Forma (IF)), agregación (Distancia Estándar Ponderada (DEP), Índice de Separación (IS) y Cohesión (COHE)), diversidad (Uniformidad de Shannon (USHAN) e Índice de Fragmentación Funcional Relativo (IFFR)) y contraste (Ratio de Contraste entre Bordes (RCB)).

A modo de síntesis, el análisis de los resultados obtenidos en los barrios de Valencia refleja una dispersión concéntrica de las edificaciones,

existiendo una mayor agrupación y densidad de los objetos urbanos (parcelas) en los barrios céntricos y ensanche. Se observa cómo al alejarse del centro de la ciudad existe una mayor dispersión y desagregación. Esto permite diferenciar cuatro tipologías o clústeres. A continuación se presentan, entre paréntesis, los valores medios por barrio de varios índices, algunos de ellos acompañados del coeficiente de variación (C_v) cuando las diferencias en la variabilidad de los índices en cada clúster resultan relevantes. La primera tipología está definida por los barrios céntricos (Figura 8, clúster 1), con una alta densidad urbana ($\overline{DU}=0,51$, $C_v=0,20$) y objetos o parcelas de pequeño tamaño ($\overline{TM}=425$ m², $C_v=0,28$; \overline{TM} vivienda=360 m², $C_v=0,30$), agrupados de manera irregular y heterogénea, próximos entre sí ($\overline{DEP}=267$ m, $C_v=0,27$). Otro grupo lo constituyen los barrios del ensanche (Figura 8, clúster 4) también con alta densidad urbana ($\overline{DU}=0,49$, $C_v=0,25$) como en el grupo anterior, pero con una distribución

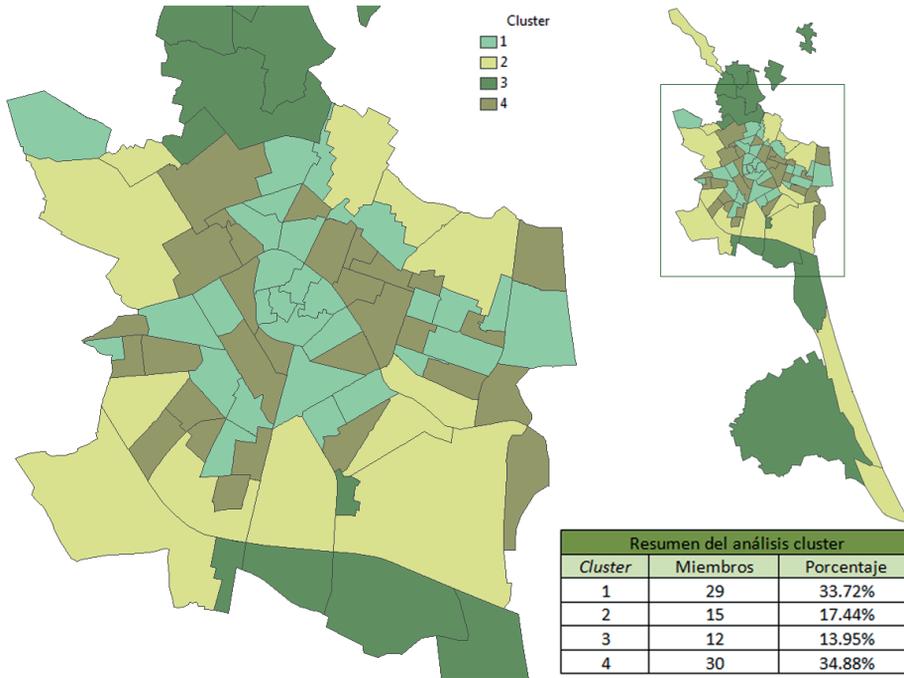


Figura 8. Análisis clúster de los resultados de fragmentación a nivel de súper-objeto de los barrios de Valencia.

espacial más homogénea, en este caso el tamaño medio de los objetos es aproximadamente el doble ($\overline{TM}=964 \text{ m}^2$; \overline{TM} vivienda= 580 m^2) y se encuentran situados ligeramente más próximos entre ellos ($\overline{DEP}=256 \text{ m}$, $Cv=0,30$). Por otro lado, los barrios de la periferia (Figura 8, clúster 2), tienen una gran superficie, una densidad urbana baja ($\overline{DU}=0,22$) y variable ($Cv=0,64$), lo que genera una fragmentación escasa, con amplias áreas agrícolas aún sin urbanizar, además se componen de parcelas en general grandes ($\overline{TM}=2848 \text{ m}^2$; \overline{TM} vivienda= 1451 m^2) aunque con tamaños variables ($Cv=0,76$ y $Cv=0,55$, respectivamente) y muy separadas entre ellas ($\overline{DEP}=665 \text{ m}$, $Cv=0,59$), con un elevado contraste entre las parcelas de la clase vivienda. Por último, los barrios que en un inicio eran pedanías y posteriormente fueron incorporados a la ciudad (Figura 8, clúster 3), son los que representan una menor densidad urbana ($\overline{DU}=0,11$), aunque con parcelas de tamaño y disposición similar a los barrios céntricos del clúster 1 ($\overline{TM}=529 \text{ m}^2$; $\overline{DEP}=268 \text{ m}$), con la particularidad de que se trata de áreas urbanas muy localizadas en relación a las dimensiones del barrio al que pertenecen (\overline{IS} clúster 3= 700732 , frente al valor de \overline{IS} clúster 1= 437). En definitiva, los índices de fragmentación calculados ayudan a interpretar y a

cuantificar los patrones de distribución de los usos del suelo que puedan existir dentro de las unidades administrativas urbanas y periurbanas, constituyendo una herramienta de análisis de particular interés en estudios urbanísticos temporales.

4. Conclusiones

Se han recopilado, a partir de un estudio exhaustivo, las medidas utilizadas hasta la fecha en el análisis de la fragmentación del paisaje, en particular aplicadas a áreas urbanas. Se ha descrito el nuevo programa *IndiFrag*, que integra y permite calcular estos índices a cualquier zona de interés de manera automática, haciendo posible su estudio en todo tipo de datos provenientes de una clasificación de usos o coberturas del suelo. Al trabajar con datos en formato vectorial permite la generación de mapas de variables o índices concretos, de forma que su potencial interpretación en diferentes fechas puede evidenciar fenómenos de evolución en áreas urbanas.

Como caso práctico, se ha aplicado a 87 barrios de la ciudad de Valencia, obteniendo resultados que ayudan a comprender la estructura de la ciudad, su morfología, dispersión, así como el nivel de

fragmentación en los distintos barrios. Los resultados pueden ser analizados objeto a objeto, para determinar características concretas de un elemento urbano, por clases si se quiere ver cómo interactúan las clases entre sí en un barrio, o una misma clase en diferentes barrios. También se pueden analizar los índices calculados para cada barrio. Además, se ha observado que a través de los resultados obtenidos del estudio de fragmentación, se pueden categorizar los barrios u otras unidades administrativas en diferentes tipologías, confirmando que las variables extraídas del análisis reflejan en gran medida la estructura de un barrio a través de la relación espacial de sus elementos. En definitiva, la herramienta *IndiFrag* facilita el estudio de la fragmentación urbana y el análisis de la morfología de la ciudad.

Con este estudio se pone de manifiesto el gran potencial del uso y análisis de los resultados provenientes de métodos de clasificación orientada a objetos en zonas urbanas, y cómo a partir de imágenes de alta resolución y datos LiDAR se pueden abrir nuevas líneas de aplicación, como es el estudio de la fragmentación de una ciudad. Estas técnicas presentan un gran interés y potencial para cuantificar cómo evolucionan las áreas metropolitanas y periurbanas, tanto geográfica, como social y económicamente.

Referencias

- Astiaso, D., Bruschi, D., Cinquepalmi, F., Cumo, F. 2013. An estimation of urban fragmentation of natural habitats: case studies of the 24 national parks. *Chemical Engineering Transactions*, 32(1), 49-54. <http://dx.doi.org/10.3303/cet1332009>
- Cánovas, F. 2012. Análisis de imágenes basado en objetos (OBIA) y aprendizaje automático para la obtención de mapas de coberturas del suelo a partir de imágenes de muy alta resolución espacial. Aplicación en la Unidad de Demanda Agraria n.º 28, Cabecera del Argos. *Revista de Teledetección*, 38, 89-90. Obtenido de http://www.aet.org.es/revistas/revista38/Numero38_12.pdf. Último acceso: abril de 2015.
- Center for Land Use Education and Research (CLEAR). 2009. Landscape Fragmentation Tools (LFT v2.0). *Universidad de Connecticut, Facultad de Agricultura y Recursos Naturales*. Obtenido de <http://clear.uconn.edu/tools>. Último acceso: octubre, 2014.
- Colaninno, N., Alhaddad, B., Roca, J. 2011. Urban models definition through image processing and morphological features, the case study of Catalonia, Spain. En: *7th Virtual Cities and Territories*, Lisbon. Lisbon, Portugal. 11-13 octubre.
- Comisión Europea. 2012. Guidelines on best practice to limit, mitigate or compensate soil sealing. *Commission staff working document*. Bruselas, Bélgica. 12 abril. pp 38-40.
- Escolano, S. 2009. Tendencias recientes de la organización espacial de los usos del suelo en las grandes ciudades latinoamericanas: el caso del Gran Santiago (Chile). *Estudios Geográficos*, 70(266), 97-124. <http://dx.doi.org/10.3989/estgeogr.0446>
- European Environment Agency (EEA). 2011. Landscape fragmentation in Europe. *EEA Report, Joint EEA-FOEN report*, 2(1), 20-30.
- Fang, J., Shenghe, L., Hong, Y., Qing, Z. 2007. Measuring urban sprawl in Beijing with geo-spatial indices. *Journal of Geographical Sciences*, 17(4), 469-478. <http://dx.doi.org/10.1007/s11442-007-0469-z>
- Frenkel, A., Ashkenazi, M. 2008. Measuring urban sprawl: how can we deal with it?. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 35(1), 56-79. <http://dx.doi.org/10.1068/b32155>
- Gong, C., Yu, S., Joesting, H., Chen, J. 2013. Determining socioeconomic drivers of urban forest fragmentation with historical remote sensing images. *Landscape and Urban Planning*, 117(1), 57-65. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.04.009>
- Hermosilla, T., Ruiz, L. A., Recio, J. A. 2010. Detección automática de edificios mediante imágenes de alta resolución y datos Lidar para la actualización de bases de datos cartográficas en entornos urbanos. *Revista de Teledetección*, 34, 89-93. Obtenido de http://www.aet.org.es/revistas/revista34/Numero34_10.pdf. Último acceso: abril, 2015.
- Hermosilla, T., Ruiz, L. A., Recio, J. A., Cambra-López, M. 2012a. Assessing contextual descriptive features for plot-based classification of urban areas. *Landscape and Urban Planning*, 106(1), 124-137. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.02.008>
- Hermosilla, T., Ruiz, L. A., Recio, J. A., Balsa-Barreiro, J. 2012b. Land-use mapping of Valencia city area from aerial images and LiDAR data. *GEOProcessing 2012: The Fourth International Conference in Advanced Geographic Information Systems, Applications and Services*. Valencia, España. 30 Enero - 4 Febrero. pp 232-237.
- Herold, M., Scepan, J., Clarke, K. C. 2002. The use of remote sensing and landscape metrics to describe structures and changes in urban land uses. *Environment and Planning A*, 34(8), 1443-1458. <http://dx.doi.org/10.1068/a3496>

- Irwin, E.G., Bockstael N. E., 2007. The evolution of urban sprawl: Evidence of spatial heterogeneity and increasing land fragmentation. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 104(52), 20672-20677. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0705527105>
- Jaeger, J. A. G. 2000. Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation. *Landscape Ecology*, 15(2), 115-130. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1008129329289>
- Lang, S., Tiede, D. 2003. vLATE Extension für ArcGIS - vektorbasiertes Tool zur quantitativen Landschaftsstrukturanalyse. *Conferencia ESRI 2003*. Innsbruck, Austria., 8-10 octubre.
- Llopis, A., Perdigón, L. 2012. *Cartografía Histórica de la Ciudad de Valencia (1606 - 1944)*. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- MacLean, M. G., Congalton, R. G., 2013. PolyFrag: a vector-based program for computing landscape metrics. *GIScience & Remote Sensing*, 50(6), 591-603.
- Marinescu, I. E., Avram, S. 2012. Evaluation of urban fragmentation in Craiova city, Romania. *Procedia Environmental Sciences*, 14, 207-215. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2012.03.020>
- McGarigal, K., Cushman, S. A., Ene, E. 2012. FRAGSTATS v4: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps. *Department of Environmental Conservation, University of Massachusetts, Amherst*. Obtenido de <http://www.umass.edu/landeco/index.html>. Último acceso: 20 de octubre, 2014.
- Rempel, R. S., Kaukinen, D., Carr, A. D. 2012. Patch Analyst and Patch Grid. *Ontario Ministry of Natural Resources. Centre for Northern Forest Ecosystem Research, Thunder Bay, Ontario*. Obtenido de <http://www.cnfer.on.ca/SEP/patchanalyst/>. Último acceso: 10 de noviembre, 2014.
- Romano, Y., Colaninno, N., Cerda, J., Roca, J., Burns, M. 2010. The relation between land occupation, density and spatial fragmentation (Spain 1956-2006). *European Regional Science Association (ERSA) 50th Congress*. Jönköping, Suecia. 19-23 agosto. pp 1-21.
- Romano, B., Tamburini, G. 2006. Urban sensibility of landscape structures in Italy, general characteristics and local details. *European Regional Science Association (ERSA) Congress*. Volos, Grecia., 30 agosto – 3 septiembre.
- Salinas, E. 2009. Fragmentación urbana y su relevancia en la planificación urbana y territorial actual. *Ignire, Centro de Estudios de Política Pública*. Obtenido de <http://www.ignire.cl/index.php/articulos2/40-16>. Último acceso 15 de abril, 2014.
- Wei, Y., Zhang, Z. 2012. Assessing the fragmentation of construction land in urban areas: An index method and case study in Shunde, China. *Land Use Policy*, 29(2), 417-428. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.08.006>
- Wu, H., Sun, Y., Shi, W., Chen, X., Fu, D. 2013. Examining the satellite-detected urban land use spatial patterns using multidimensional fractal dimension indices. *Remote Sensing*, 5(10), 5152-5172. <http://dx.doi.org/10.3390/rs5105152>

