

# Análisis fractal del crecimiento urbano y su afectación al humedal Gualí-Tres Esquinas en los municipios de Mosquera y Funza entre 1940 y 2009

Fractal analysis on urban growth and its impact on the wetland Gualí-Tres Esquinas in the municipality of Mosquera and Funza between 1940-2009

Dallana Katherine López Gómez<sup>1</sup> y Wilson Armando Gómez Cubillos<sup>2</sup>

## Resumen

En este artículo se analiza la relación entre los diferentes elementos o parcelas del humedal Gualí mediante el análisis de geometría fractal. Con base en imágenes aéreas de la zona desde el año 1940 al 2009, se hace un análisis multitemporal de la evolución de las parcelas, con el propósito de caracterizar el humedal mediante diferentes índices: densidad de parches (PD), densidad de frontera (ED), índice de interdispersión y yuxtaposición (IJI) y dimensión fractal perímetro área (Pafrac). A partir de las imágenes aéreas se delimitan las parcelas para formar los polígonos que hacen parte de un Sistema de Información Geográfica (SIG). Para cada parcela se calculan los diferentes índices en cada uno de los años. Como resultado se obtiene una curva por cada índice. Con estas curvas se infiere que la densidad de parches y de frontera ha aumentado; el índice de inter-

dispersión y yuxtaposición creció hasta un máximo en el 2004 y desde entonces solo ha decrecido, y el índice Pafrac en general decrece. Por ello, se concluye que hay una intervención antrópica al humedal, dado el cambio de las parcelas dominantes, de cultivos y pastos a construcciones, lo cual afecta el área de conservación del humedal.

**Palabras clave:** desarrollo urbanístico, paisaje, afectación, humedal, multitemporal, fractal, densidad de los parches, densidad de la frontera, índice de interdispersión y yuxtaposición.

<sup>1</sup> Ingeniera ambiental de la Universidad Central. Correo: dlopezg1@ucentral.edu.co.

<sup>2</sup> Matemático de la Universidad Distrital e ingeniero ambiental de la Universidad Central, con especialización en Seguridad Informática en la Escuela de Comunicaciones del Ejército Nacional de Colombia. Correo: wgomezc3@ucentral.edu.co.

## Abstract

The relationship between the different elements or patches of the Gualí wetland is analyzed through the use of fractal geometry analysis; making use of aerial images of the area from the year 1940 to 2009, a multitemporal analysis of the evolution of the patches is obtained. The purpose is to characterize the wetland by different indexes, as they are; Density of patches (PD), border density (ED), interdispersion and juxtaposition index (IJI) and fractal dimension perimeter area (Pafrac). From the aerial images the different patches are delimited; forming polygons that are part of a Geographic Information System (GIS). The different patches are calculated the different indices in each of the years. As a

result a curve is obtained for each index, from which it can be inferred that; the density of patches and frontier increases, the interdispersion and juxtaposition index grows to a maximum in 2004 from which it only decreases and the Pafrac index generally decreases. It is concluded that there is anthropogenic intervention to the wetland as there is a change from the dominant patch of crops and pastures to the patch of buildings affecting the area of conservation of the wetland.

**Keywords:** urban development, landscape, affectation, wetland, multitemporal, fractal, density of the patches, density of the border, index of interspersation and juxtaposition.

## 1. Introducción

La importancia del humedal Gualí-Tres Esquinas se fundamenta en varios aspectos: bióticos, ecosistémicos, hidrológicos, paisajísticos, recreativos, históricos y culturales. Esta importancia es vital para los municipios a los que pertenece, en particular, para los municipios de Mosquera y Funza. Además, el humedal está suscrito a la Convención de Ramsar (“Convención relativa a los humedales de importancia internacional especialmente como hábitat de aves acuáticas”) y es uno de los 1827 en la clasificación de *humedal continental* (Andrade y Benítez, 2005; Redacción Bogotá, 2014; Vásquez, Ariza y Pinilla, 2006). En este artículo, el humedal se analiza desde el punto de vista de la fragmentación, que se presenta, por ejemplo, a nivel urbano, cuencas hidrográficas, cuerpos de agua y demás. Desde este punto de vista, los elementos que hacen parte

del paisaje (parcelas, teselas o parches) son las fragmentaciones (Miller, Damschen, Harrison y Grace, 2015). El estudio de la fragmentación de un paisaje ayuda a entender la interacción de los elementos de un paisaje, con el fin de caracterizar e identificar aquellos elementos que afectan o que son afectados, en pro de la sostenibilidad del paisaje (Homa, Brown, McGarigal, Compton y Jackson, 2013).

El estudio de un paisaje, de sus parcelas y sus patrones no lineales, requiere acudir a diferentes métodos para entender la complejidad del paisaje. Las formas geométricas de la naturaleza suelen ser formas intrincadas e irregulares, que presentan picos y curvas pronunciadas en un aparente desorden. Sin embargo, tales irregularidades son semejantes a diferentes escalas, es decir, se pueden apreciar igual de intrincadas sin importar qué tan cerca o lejos nos encontremos de la curva evaluada. Esto parece sugerir que en el aparente desor-

den hay una constante a través de las diferentes escalas (Feng y Liu, 2015; Wu, Sun, Shi, Chen y Fu, 2013).

La teoría fractal desarrollada por el matemático polaco Benoît Mandelbrot supuso un cambio de paradigma respecto a la geometría euclidiana. Esta teoría logró cuantificar las formas geométricas caóticas al asignarles una dimensión. Gracias a esto, fue posible cuantificar formas geométricas de la naturaleza, aunque el objetivo inicial de Mandelbrot no era tratar de cuantificar la naturaleza. Los inicios de esta teoría se encuentran en las llamadas “curvas patológicas”, formas geométricas tan extrañas y exóticas que exigían asumir la existencia de curvas de longitud infinita, acotadas y, además, no diferenciables en ningún punto. Estas curvas patológicas (entre ellas la curva de Koch, la curva copo de nieve, el triángulo de Sierpinski, la curva de Peano, etc.) eran evitadas por los matemáticos, ya que el estudio de las curvas se realizaba usando el concepto de *derivada* (Kasner y Newman, 2007).

Mandelbrot popularizó el adjetivo *fractus*, que significa “interrumpido” o “irregular”. En el libro *Los objetos fractales: forma, azar y dimensión*, Mandelbrot expone las diferentes definiciones de dimensión fractal, entre ellas la dimensión de Hausdorff-Besicovitch y la dimensión de homotecia. Estas definiciones son útiles para los fractales determinísticos, esto es, fractales con una definición matemática formal. Pero para el caso de los fractales no determinísticos, la autosimilitud es estadística; en un fractal “determinístico” se puede encontrar una y otra vez la misma forma original al hacer sucesivos acercamientos, pero en un fractal no determinístico, dado que está limitado por la escala atómica, tales acercamientos están limitados. Por tal motivo se hace uso del análisis numérico, y el método

más usado es el *box-counting* o conteo de cajas (Mandelbrot, 1988).

Los métodos utilizados para calcular la dimensión fractal de imágenes —en este caso, imágenes de cuerpos de agua y su entorno— ayudan a extraer información que no se podría obtener con la geometría euclidiana. Así, caracterizar un paisaje mediante el estudio de la forma que toman las diferentes fragmentaciones hace que el análisis de un sistema complejo sea más útil. El método de conteo de cajas y sus variantes hacen que el proceso de análisis sea cuantificable y confiable (Long y Peng, 2013; Kaewaramsri y Woraratpanya, 2015). Aun así, existen otros métodos, como el conteo de conflagraciones producidas en regiones boscosas, que se realiza sobre las proximidades de cada punto de conflagración haciendo variar un radio con centro en el incendio y acumulando los incendios producidos en su interior. Este conteo sigue un patrón de autosimilitud que sirve para encontrar qué factores son atenuantes o agravantes de sus formaciones (Haire, McGarigal y Miller, 2013). En este sentido, la dimensión fractal es ampliamente aplicable en el estudio de la naturaleza, ya sea para un paisaje urbano o natural.

La descripción de un territorio mediante el método de conteo de cajas usando imágenes a color se hace estudiando la distribución de los valores RGB (Wang y Ogawa, 2015). Hay un conjunto de índices que da una caracterización muy completa de un paisaje, ya que relaciona diferentes variables, como el perímetro, el área, polígonos con características particulares, entre otras. Tales índices son descritos en un *software* llamado Fragstats, el cual analiza una imagen y brinda información que puede ser usada en la planificación y sostenibilidad de un territorio (Arranz, Soria-Lara y Aguilera, 2014; McGarigal, 2015).

El objetivo de este estudio es hacer un análisis multitemporal del humedal Gualí-Tres Esquinas (figura 1) y sus parcelas de construcciones, cultivos y pastos, cuerpos de agua, entre otros, para evaluar qué elementos del paisaje están impactando de manera negativa la sostenibilidad del humedal, que está siendo afectado por la construcción de bodegas, obras civiles, etc. Así, este artículo describe cómo se procesó la información para diferentes años, cómo se extrajo información y además se representa dicha información en graficas, mediante las cuales se pueden inferir diferentes tendencias a través del tiempo que evidencian la afectación del humedal.



**Figura 1.** Humedal Gualí-Tres Esquinas, 2017.

Fuente: elaboración propia.

## 2. Métodos

Para el estudio multitemporal de los cambios del humedal Gualí-Tres Esquinas entre 1940 y 2009, se desarrolló una metodología con carácter dinámico, que consta de dos fases: a) obtención de la información básica y b) desarrollo del análisis multitemporal.

### 2.1 Obtención de la información básica

La información básica está integrada por aerofotografías entre 1940 y 2009. Dichas imágenes se han generado con la aplicación de la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia (CLC-C), por medio de la interpretación visual en pantalla. Cabe destacar que, para la obtención de estos mapas, se cumplieron todos los pasos indicados por la metodología CLC-C: procesamiento digital de las imágenes; estructuración de la geodatabase; estructuración de la leyenda adaptada para el humedal Gualí-Tres Esquinas; interpretación visual de las imágenes; trabajo de campo; control de calidad, y consolidación de la base de datos.

### 2.2 Desarrollo del análisis multitemporal

- *Generalización.* Es necesario hacer una generalización cartográfica para llevar todas las fotografías a un *buffer* de 100 m. Esto permite hacer una comparación coherente con el mapa producido por interpretación de la fotografía.
- *Comparación por superposición.* Con los mapas superpuestos de la misma área de influencia en los años estudiados, se hace la comparación correspondiente para detectar cambios o desplazamientos de los parches de la zona.

- *Obtención de estadísticas.* Con la información del cruce de mapas se obtienen datos estadísticos sobre cambios por pérdida o ganancia, áreas constantes, entre otros, del área de influencia total del humedal.
- *Caracterización.* Para caracterizar las aerofotografías de diferentes épocas que se usaron para el estudio (tabla 1), los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ofrecen varias facilidades. Esta caracterización se basa en el objetivo principal de conocer el estado del humedal.

Tabla 1. Aerofotografías disponibles del humedal Gualí-Tres Esquinas

Vuelo	Fotografías	Fecha de toma	Escala	Buffer (m)
C-22	292	11/02/1940	1:22000	100
C-2233	51	04/03/1985	1:22000	100
C-2613	8	01/02/1997	1:22100	100
	9			100
C-2661	204	05/08/1999	1:10900	100
	205			100
	7			100
	79			100
C-2664	80	29/10/1999	1:10686	100
	189			100
	190			100
C-2673	172	01/04/2003	1:29000	100
	173			100
C-2717	222	16/02/2004	1:21390	100
	223			100
C-2750	127	11/06/2005	1:22100	100
C-2802	36	05/02/2007	1:38400	100
	35			100
C-2800	4	02/02/2007	1:39800	100
	5			100
C-277	157	03/11/2009	1:22000	100

Fuente: elaboración propia.

- *Análisis fractal e índices.* Los índices del análisis fractal son valores numéricos que cuantifican alguna característica objeto de estudio tanto de parches o teselas, los cuales son elementos que conforman el paisaje y reparten el área de estudio según sus características de cobertura y uso del suelo. Los diferentes parches interactúan entre sí y afectan de diferentes maneras la flora y la fauna que subsisten en ellos. Existen diferentes índices que proporcionan información necesaria para realizar un análisis espacio-temporal de la dinámica propia de las teselas existentes en el humedal en cuestión (McGarigal, 2015). Tales índices son:

- *Densidad de los parches (PD)*: es la cantidad de parcelas en un paisaje por cada 100 hectáreas. Este índice es útil para evaluar qué tanto se ha fraccionado paisaje a través del tiempo. Además, este índice tiende a aumentar por la intervención antrópica (McGarigal, 2015).

$$PD = \frac{n}{a} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

$n$  número de parches  
 $a$  área (ha)

$$ED = \frac{E}{a} \quad (\text{Ec. 2})$$

- *Densidad de la frontera (ED)*: es la cantidad en metros de frontera por cada hectárea. Este índice aumenta a medida que el paisaje empieza a aumentar su complejidad, esto es, cuando la cantidad de parcelas aumenta o las parcelas tienen formas rugosas. Al aumentar el contacto entre las diferentes parcelas, también aumenta la afectación que puede producirse (McGarigal, 2015).

$$IJI = \frac{-\sum_{i=1}^m \sum_{k=i+1}^m \left( \frac{e_{ik}}{E} \ln \frac{e_{ik}}{E} \right)}{\ln(0,5(m(m-1)))} 100\% \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

$ED$  densidad de la frontera  
 $E$  total de la frontera (m)  
 $a$  área (ha)

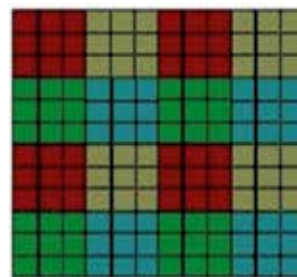
$$2 \left( \frac{(N \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \ln p_{ij}) - (\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \ln p_{ij})(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \ln a_{ij})}{(N \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \ln p_{ij}) - (N \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \ln p_{ij})^2} \right)^{-2} \quad (\text{Ec. 4})$$

- *Índice de interdispersión y yuxtaposición (IJI)*: este índice calcula el porcentaje en función de la cantidad de parcelas y sus fronteras, de modo que aumenta proporcionalmente a medida que estas variables se incrementan. Así, mide qué tan fragmentado e irregular está tanto

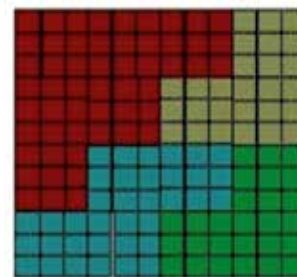
el paisaje como las parcelas. Si el área de un paisaje está dominada por una parcela en particular, este valor tiende a ser alto. Como ejemplo se muestra la figura 2 (McGarigal, 2015).

Donde:

$e_{ik}$  longitud en común entre la clase  $i$  y  $k$   
 $E$  longitud total del paisaje (m)  
 $m$  cantidad de clases



Valor alto de IJI



Valor bajo de IJI

Figura 2. Ejemplo de índice de interdispersión y yuxtaposición (IJI).

Fuente: McGarigal (2015).

- *Dimensión fractal perímetro-área (Pafrac)*: este índice fue propuesto por Mandelbrot (1983) para relacionar el área y el perímetro mediante una función que contiene como exponente la dimensión fractal, la cual es hallada mediante una regresión lineal (Lovejoy, 1982). Este índice es un valor que está entre uno y dos. Para valores cercanos a uno, significa que la geometría de las parcelas son seme-

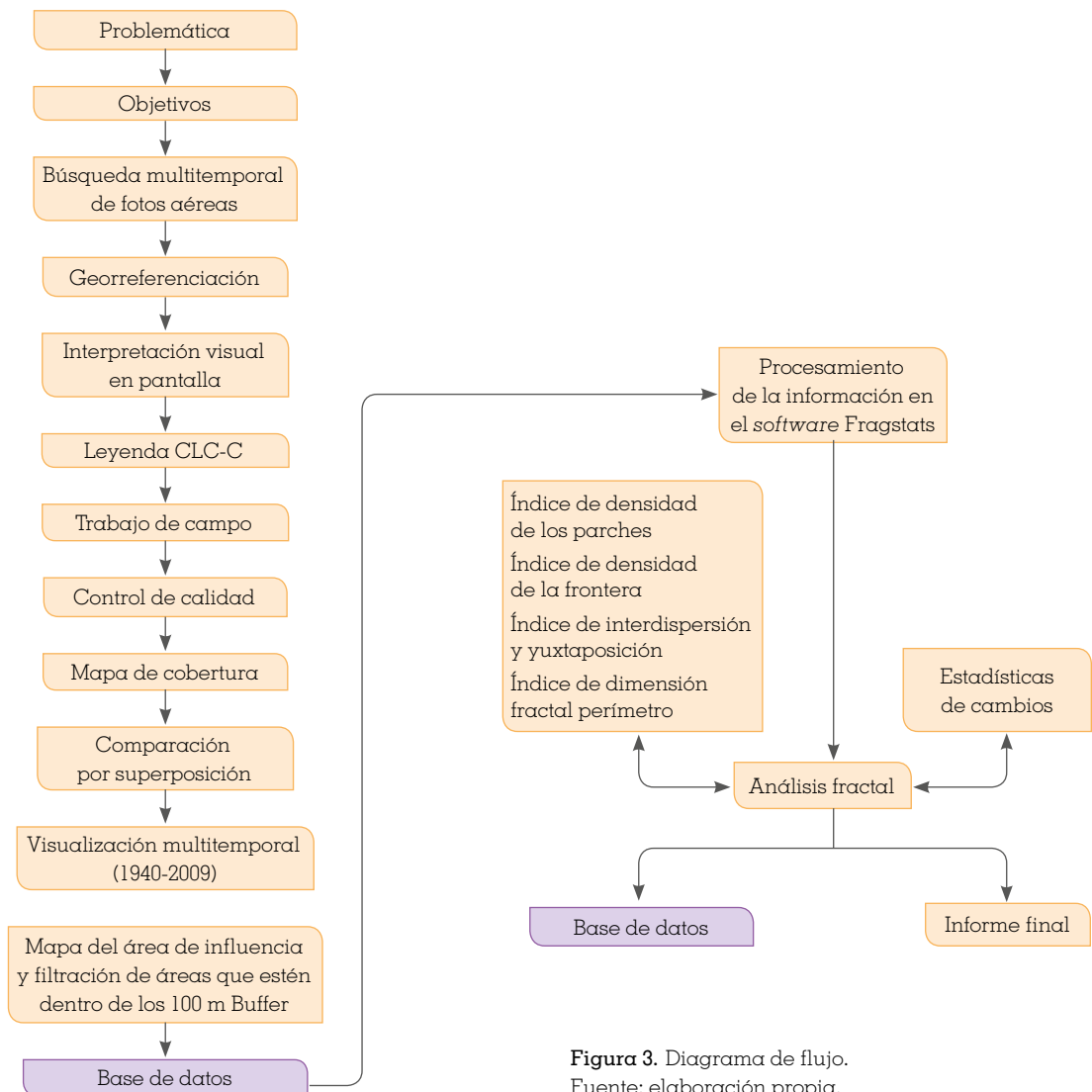
jantes a figuras geométricas propias de la geometría euclidiana, tales como cuadrados, circunferencias o polígonos. Para valores cercanos a dos, se tiene que las parcelas tienen formas geométricas rugosas e intrincadas, propias de las formas

geométricas que aparecen en la naturaleza (McGarigal, 2015).

- $a_{ij}$  área ( $m^2$ ) de la parcela  $ij$
- $p_{ij}$  perímetro (m) de la parcela  $ij$
- $N$  total de parcelas en el paisaje

### 3. Diagrama de flujo

A continuación se incluye el diagrama de flujo de todo el desarrollo metodológico de la investigación (figura 3).



**Figura 3.** Diagrama de flujo.  
Fuente: elaboración propia.

## 4. Resultados

Los cambios presentados en la dinámica del humedal Gualí-Tres Equinas son representados en los siguientes mapas y estadísticas (figuras 4 y 5).

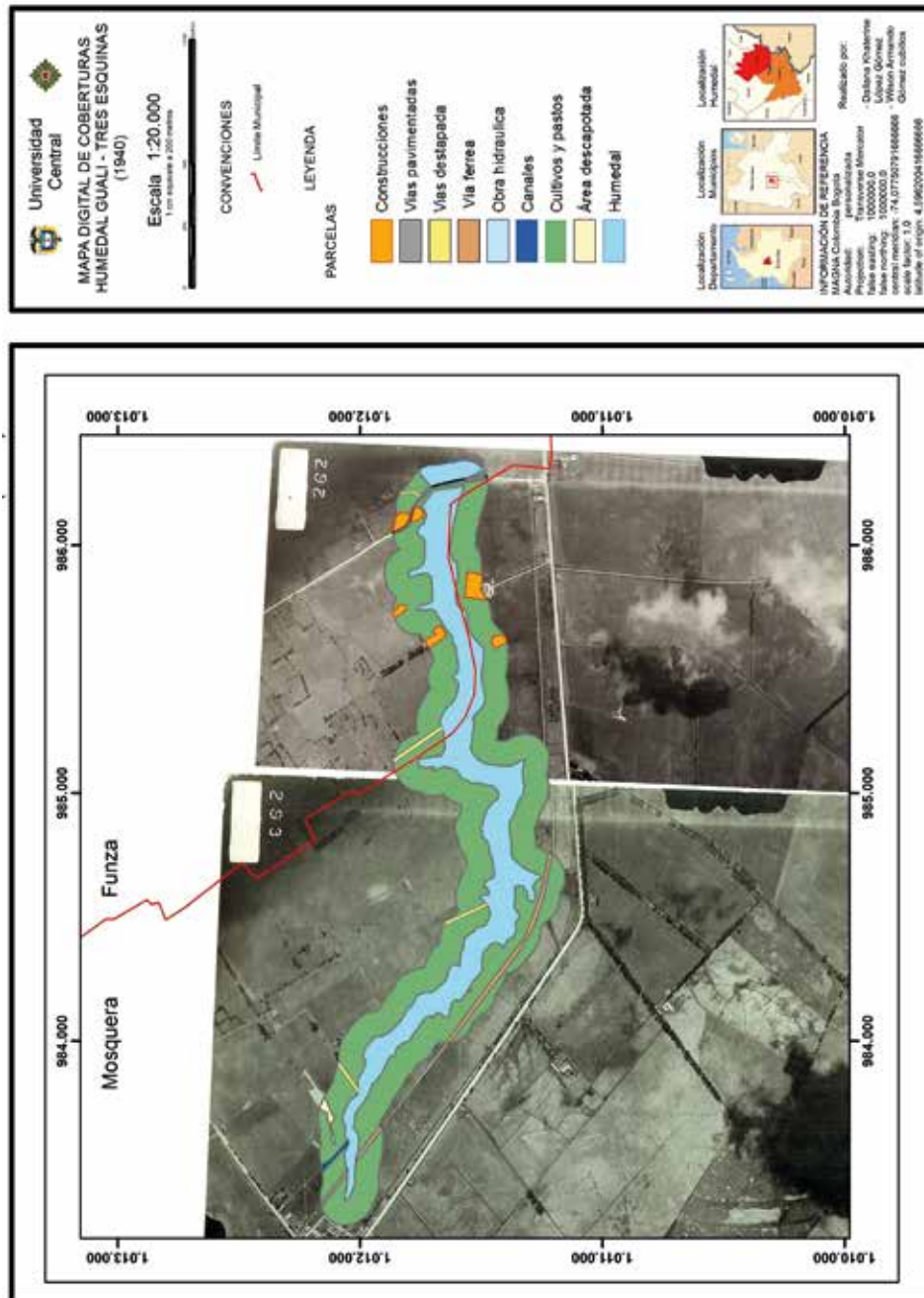


Figura 4. Mapa de coberturas del humedal Gualí-Tres Esquinas, 1940.  
Fuente: elaboración propia.



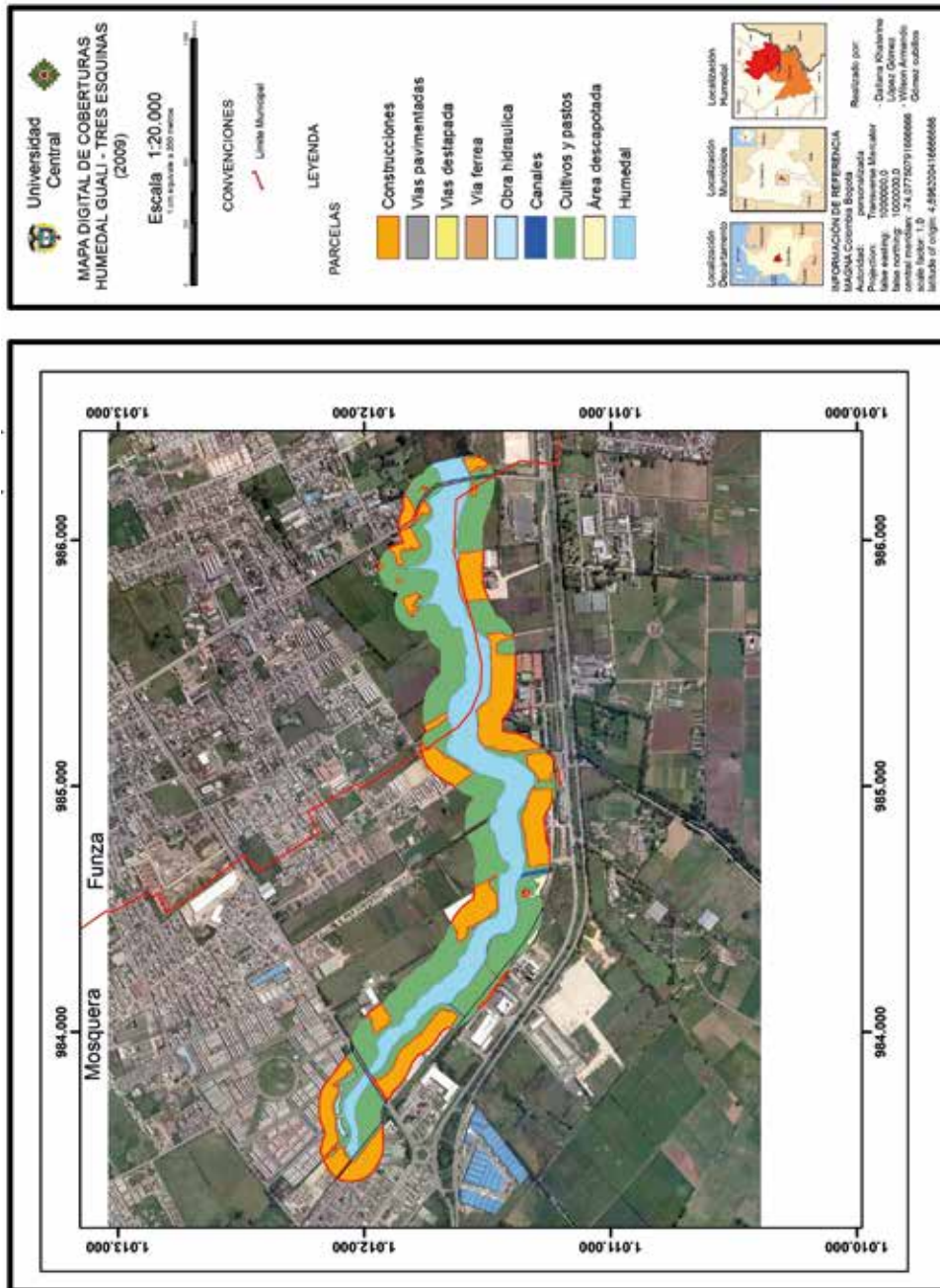


Figura 5. Mapa de coberturas del humedal Gualí-Tres Esquinas, 2009.  
 Fuente: elaboración propia.

Los dos mapas anteriores son del primer y último año de los siete analizados. Allí se ve que las parcelas que más influyen en el paisaje y su evolución son las de construcciones y las del cuerpo de agua del humedal. EA través del tiempo, el área total del humedal muestra una tendencia decreciente (tabla 2). Donde el cambio es más notable es en los dos primeros años. Hay un leve incremento del área en los últimos años, debido a una obra civil.

Tabla 2. Área total del humedal a través del tiempo

Año	Área total (m <sup>2</sup> )
1940	1 134 861
1985	1 023 482
1999	1 023 459
2004	992 845
2005	987 848
2007	994 190
2009	1 009 784

Fuente: elaboración propia.

El cuerpo de agua, que ocupaba gran parte del humedal en su estado más natural en los primeros años, ha tendido a disminuir, en contraste con el área ocupada por la construc-

ción, principalmente de viviendas y bodegas (figura 6).

La fragmentación del humedal ha aumentado con el tiempo, y tal incremento fue más evidente en los primeros años (figura 7).

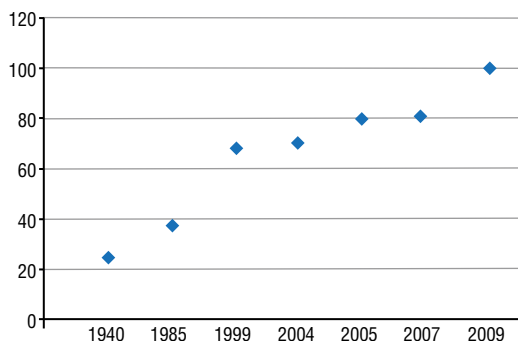


Figura 7. Densidad de parches a través del tiempo. Fuente: elaboración propia.

El contacto entre las diferentes parcelas también es cada vez mayor, si bien se mostraba casi constante entre los dos primeros años (figura 8). Este incremento está relacionado con el incremento de la densidad de parcelas, ya que el aumento de la fragmentación de un paisaje provoca una mayor interrelación entre las parcelas.

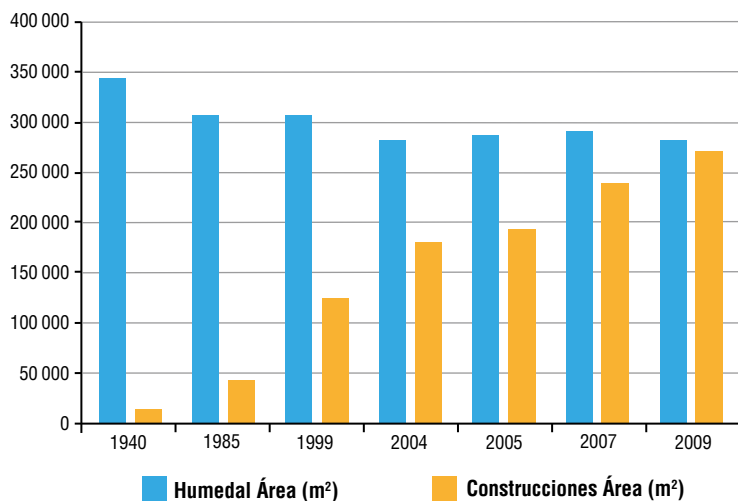
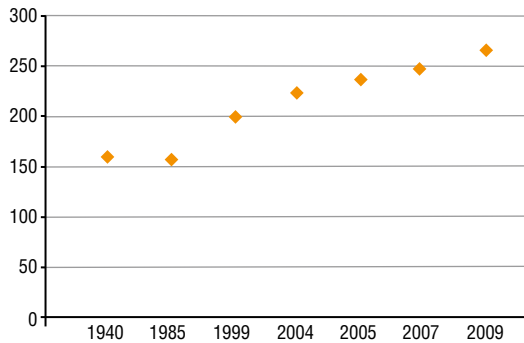


Figura 6. Área del humedal vs. área de construcciones.

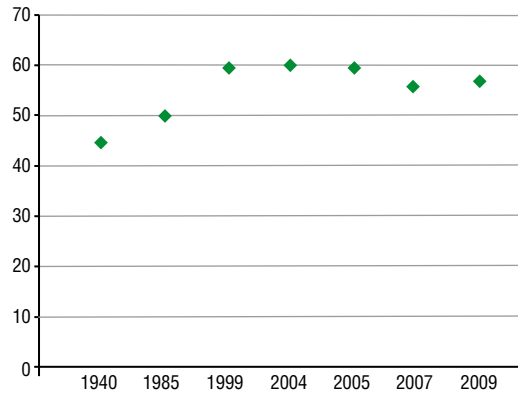
Fuente: elaboración propia.



**Figura 8.** Densidad de frontera entre parcelas a través del tiempo.

Fuente: elaboración propia.

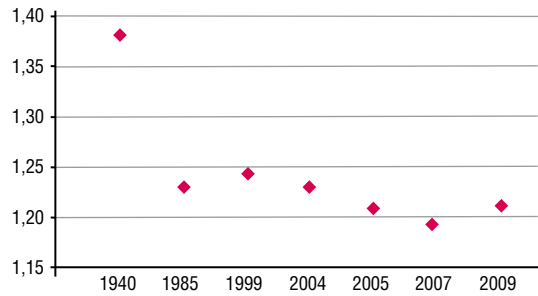
El índice de dispersión y yuxtaposición tiene su máximo valor en los años centrales. También se evidencia que en los primeros años el índice era menor en comparación con los últimos años (figura 9).



**Figura 9.** Índice de dispersión y yuxtaposición a través del tiempo.

Fuente: elaboración propia.

En cuanto al índice Pafrac, hay un gran cambio en las formas geométricas en los dos primeros años en comparación con el resto de años, que evidencia un paso de las formas geométricas irregulares e intrincadas a ser más regulares. Esto se debe a que el intervalo de tiempo en los dos primeros años es mayor que los demás. En general, la función es decreciente, aunque al final presenta un leve incremento debido a una obra hidráulica (figura 10).



**Figura 10.** Pafrac a través del tiempo.

Fuente: elaboración propia.

## 5. Discusión

La interpretación de los datos encontrados permite conocer aspectos importantes en la evolución del humedal Gualí. La información analizada tiene como punto de partida para la comparación la aerofotografía del año 1940, en la cual el humedal aparece en su estado más natural. En la información encontrada hay un lapso de 45 años, entre los años 1940 y 1985 (primeras dos imágenes), en el que no se encontró información. Esto hace que los resultados tengan cambios grandes que impiden un análisis del todo continuo en la evolución del humedal. Los resultados están relacionados con eventos en la historia colombiana que valdría la pena explorar en otras investigaciones posteriores, como la conurbación acelerada del humedal Gualí, producto del desplazamiento de personas desde Bogotá y otros lugares del país a los municipios aledaños; o el cambio de interés de los dueños de las tierras cercanas al humedal, que dejaron de usar sus terrenos para ganadería y cultivos para usarlos en la construcción de viviendas y bodegas.

## 6. Conclusiones

- El aumento de la complejidad del área de estudio provoca una afectación al humedal, al haber cada vez más parches de origen antrópico, además de una disminución del área del humedal.
- El humedal presenta un cambio en la parcela de mayor área, que pasó de ser la de cultivos y pastos a ser la de construcciones.
- Las parcelas de origen antrópico aumentaron al transcurrir el tiempo, dado que su geometría pasó de tener formas irregulares a regulares, como canales, zonas urbanas o residenciales, vías o zonas descapotadas, formas que no son propias de la geometría original de la naturaleza.
- El análisis mediante índices fractales es una herramienta útil para los planes de ordenamiento territorial, ya que describe de manera óptima las condiciones de las zonas a estudiar y además logra predecir sus condiciones en el futuro.

## Agradecimientos

Damos primeramente gracias a Dios por su inmenso amor y su orientación en todo momento; a nuestra directora de tesis, la profesora María Teresa Gómez Velasco, quien con sus conocimientos y sus orientaciones ha inculcado en nosotros un gran sentido de responsabilidad y rigor académico, fundamental en nuestra formación como investigadores e innovadores. Queremos hacer extensiva nuestra sincera gratitud al apoyo brindado por el grupo de Cobertura y Suelos del IGAC, dirigido por el doctor Luis Hernando Melo Wilches, quienes supervisaron e hicieron recomendaciones para la elaboración de calidad de la información depositada en nuestro proyecto.

## Referencias

- Andrade, M. y Benítez, H. (2005). Los humedales de la sabana de Bogotá: área importante para la conservación de las aves de Colombia y el mundo. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Bogotá, Colombia.
- Arranz, A., Soria-Lara, J. A. y Aguilera Benavente, F. (2014). ¿Son útiles las “métricas espaciales fragstats” para caracterizar entornos de movilidad urbanos? En *Tecnologías de la información para nuevas formas de ver el territorio: XVI Congreso Nacional de Tecnologías de Información Geográfica, celebrado del 25 al 27 de junio de 2014, en Alicante* (pp. 321-329). Madrid: Asociación de Geógrafos Españoles.
- Feng, Y. y Liu, Y. (2015). Fractal dimension as an indicator for quantifying the effects of changing spatial scales on landscape metrics. *Ecological Indicators*, 53, 18-27.
- Haire, S. L., McGarigal, K. y Miller, C. (2013). Wilderness shapes contemporary fire size distributions across landscapes of the western United States. *Ecosphere*, 4 (1), 1-20.
- Homa, E. S., Brown, C., McGarigal, K., Compton, B. W. y Jackson, S. D. (2013). Estimating hydrologic alteration from basin characteristics in Massachusetts. *Journal of Hydrology*, 503, 196-208.
- Kaewaramsri, Y. y Woraratpanya, K. (2015). Improved triangle box-counting method for fractal dimension estimation. En *Recent advances in information and communication technology 2015* (pp. 53-61). Cham, Suiza: Springer.
- Kasner, E. y Newman, J. (2007). *Matemáticas e imaginación*. México D. F.: Consejo Nacional para la Cultura y las Artes.

- Long, M. y Peng, F. (2013). A box-counting method with adaptable box height for measuring the fractal feature of images. *Radioengineering*, 22 (1), 208-213.
- Lovejoy, S. (1982). Area-perimeter relation for rain and cloud areas. *Science*, 216 (4542), 185-187.
- Mandelbrot, B. (1983). *The fractal geometry of nature*. New York: WH Freeman and Co.
- Mandelbrot, B. (1988). *Los objetos fractales: forma, azar y dimensión* (J. Llosa, trad.). Barcelona: Tusquets Editores.
- McGarigal, K. (2015). Fragstats Help (documento). University of Massachusetts. Consultado en <https://bit.ly/2OCVF4y>.
- Miller, J. E., Damschen, E. I., Harrison, S. P. y Grace, J. B. (2015). Landscape structure affects specialists but not generalists in naturally fragmented grasslands. *Ecology*, 96 (12), 3323-3331.
- Redacción Bogotá. (2014, 9 de octubre). A recuperar el humedal Gualí. *El Espectador*. Consultado en <https://bit.ly/2OBKSaG>.
- Vásquez, C., Ariza, A. y Pinilla, G. (2006). Descripción del estado trófico de diez humedales del Altiplano Cundiboyacense. *Universitas Scientiarum*, 11 (2).
- Wang, J. y Ogawa, S. (2015). Fractal analysis of colors and shapes for natural and urbanscapes. *Urbanscapes. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40 (7), 1431.
- Wu, H., Sun, Y., Shi, W., Chen, X. y Fu, D. (2013). Examining the satellite-detected urban land use spatial patterns using multidimensional fractal dimension indices. *Remote Sensing*, 5 (10), 5152-5172.