

Dinámica espacio temporal del paisaje periurbano en la frontera México - Estados Unidos.

El caso de Ciudad Juárez, Chihuahua

Sánchez Flores, Erick; Granados Olivas, Alfredo; Chávez, Javier
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, Chihuahua, México

Los cambios en la cobertura y uso del suelo asociados a los procesos de urbanización representan en todo el mundo una de las formas más severas de alteración de los ecosistemas. Estos cambios, generalmente están ligados a otras formas de degradación ambiental que afectan la calidad de los servicios y bienes ambientales y por ende repercuten en la calidad de vida de la sociedad. Desde hace algunas décadas han surgido diferentes alternativas tecnológicas para el monitoreo oportuno y preciso de los cambios en la cobertura y uso del suelo, indispensable para entender las complejas relaciones de los sistemas socioeconómicos y naturales, sobre todo en las áreas de rápida expansión urbana. El acelerado crecimiento de la ciudad y la frecuente falta de observación de los planes de desarrollo en la región fronteriza de Ciudad Juárez, Chihuahua han puesto en evidencia alteraciones en la estructura y función natural de los ecosistemas periurbanos, que son el resultado directo de los cambios en la cobertura y uso del suelo. El objetivo de este trabajo fue evaluar los cambios en la dinámica de ocupación del suelo y su expresión en la estructura del paisaje mediante la aplicación de herramientas geotecnológicas. Esta evaluación se llevó a cabo mediante la utilización de imágenes de satélite de alta resolución del periodo 2002-2007, caracterizado por un intenso crecimiento de la superficie urbana. La extracción de los usos y coberturas del se suelo se realizó mediante la interpretación de las imágenes utilizando un enfoque de clasificación supervisada basado en objetos. La dinámica del paisaje, expresión espacio-temporal de los cambios en el territorio, se evaluó bajo el enfoque de la ecología del paisaje utilizando medidas de organización espacial de los diferentes usos y coberturas extraídos. Los resultados muestran un incremento en la fragmentación del paisaje en las áreas de crecimiento urbano, así como una estrecha correlación con la localización de problemas ambientales, incluidas recientes inundaciones. A pesar de la evidencia encontrada, el establecimiento de relaciones más robustas, entre el carácter del proceso de urbanización que está ocurriendo y sus efectos en la dinámica del paisaje, requiere de un mayor periodo de análisis y la utilización de otras fuentes de datos que proporcionen mayores evidencias de los efectos de conversión del suelo sobre la estructura y función del paisaje a diversas escalas.

Palabras clave: cambios en la cobertura y uso del suelo, dinámica del paisaje, sistemas de percepción remota, imágenes de alta resolución, expansión urbana.

1. Introducción

Los cada vez más graves problemas ambientales y sus efectos ecológicos, económicos y sociales han motivado el establecimiento de un consenso respecto a la necesidad de estudiar y entender a fondo las consecuencias que se producen de los procesos de intervención de la sociedad sobre la naturaleza. La evidencia encontrada hasta ahora señala que la mayoría de estos problemas tienen su origen en los graves desequilibrios impuestos por el acelerado crecimiento de la población y en el consumo excesivo de recursos. En la historia de la humanidad tuvieron que transcurrir 12 mil años desde el inicio de la sedentarización del hombre, para que la población mundial alcanzara los 1000 millones de habitantes en 1800, poco después del inicio de la Revolución Industrial. A partir de este punto, la población se duplicó después de poco más de un siglo y alcanzó los 3000 millones en tan sólo 30 años en 1960. Desde esta fecha, la población mundial se ha incrementado en 1000 millones cada 12 a 15 años, alcanzando los 6,450 millones para el 2005 (UN-HABITAT 2003). Considerando este ritmo de crecimiento es fácil intuir que la satisfacción de las necesidades de una población en franco aumento ha impuesto grandes presiones sobre los sistemas naturales, creando desbalances que hoy plantean retos a escala planetaria.

Los cambios en la cobertura y uso del suelo asociados a los procesos de urbanización representan en todo el mundo una de las formas más severas de alteración de los sistemas naturales y una de las muestra más claras de influencia del hombre sobre el territorio. Estos cambios, generalmente están ligados a otras formas de degradación ambiental que afectan la calidad de los servicios y bienes ambientales que los ecosistemas que proveen los ecosistemas, y por ende repercuten en la calidad de vida de la sociedad (Watson *et al.* 2000). La urbanización es considerada en si una de las fuerzas antropogénicas más poderosas y visibles sobre el planeta, cuya influencia sobre el medio ambiente se manifiesta a escalas local, regional y global (Christensen *et al.* 2003). De hecho, las áreas urbanas densamente pobladas representan uno de los ambientes terrestres más alterados debido a la forma y velocidad con las que se da el proceso de transformación de uso del suelo.

De acuerdo con la ONU, en la segunda mitad de siglo XX, la población urbana en todo el mundo casi se cuadruplicó de 732 millones en 1950 a 2,800 millones en el 2000. Para el 2005 el 49% de la población mundial, 3,180 millones de habitantes, vivía en ciudades. En el 2008, por primera vez en la historia de la humanidad, la población mundial cruzó el umbral y más de la mitad de sus habitantes vive ya en áreas urbanas (Lee 2007). Este hecho constituye un verdadero hito en la historia de la civilización, que además de traer consigo enormes implicaciones socioeconómicas, habla de la demanda cada vez mayor de suelo para la construcción de espacios urbanos. Así, el acelerado crecimiento de la población urbana, se instala entonces como un factor determinante en la transformación de los usos de suelo naturales a urbanos en todo el mundo.

En este contexto, estudiar y monitorear la dinámica espacial y temporal del uso y cobertura del suelo, resultado de la expansión de las áreas urbanas se convierten en tareas esenciales para entender los efectos de esta transformación sobre las variables que integran el medio ambiente como un sistema interconectado y en frágil equilibrio (Rindfuss *et al.* 2005). En auxilio de estas tareas es importante destacar el papel que, en las últimas décadas, han desempeñado las aplicaciones geotecnológicas, en particular los sistemas de percepción remota, para monitorear de forma exacta y oportuna las tendencias del uso y cobertura del suelo en las áreas de crecimiento urbano.

Los sistemas de percepción remota constituyen una herramienta de uso común en el estudio de los cambios en el uso y cobertura del suelo gracias a que ofrecen una visión sinóptica de carácter multi-temporal del territorio, además de que su disponibilidad en formato digital facilita su procesamiento (Lu *et al.* 2004). En el ámbito de la percepción remota, el monitoreo de los cambios en el territorio puede llevarse a cabo al detectar las diferencias en los valores de reflectancia de un objeto observado en dos fechas distintas (Lambin y Strahler 1994). Una vez que las unidades espaciales que han sufrido cambios se detectan, éstas pueden ser utilizadas para evaluar la reconfiguración espacial y temporal de los diferentes usos y coberturas en el territorio, utilizando los principios conceptuales y metodológicos de la ecología del paisaje (Forman y Gordon 1986; Turner *et al.* 2001). Dentro de este enfoque, una unidad espacial de cambio puede ser entendida como una unidad de paisajes o un área discreta con condiciones de uso y cobertura relativamente homogéneas a una escala particular.

El análisis de la reconfiguración del paisaje visto desde esta perspectiva sirve además para establecer relaciones con procesos ecológicos y riesgos ambientales que ocurren en el territorio. Los cambios en el uso y cobertura del suelo representan cambios en la configuración del paisaje que a su vez tienen efectos en el funcionamiento de servicios ecológicos esenciales como el abasto y regulación de agua superficial y subterránea; el control de la erosión y retención de sedimentos; la asimilación de desechos; los procesos de formación del suelo; el abasto de recursos genéticos; y la provisión de oportunidades de recreación y esparcimiento (Costanza *et al.* 1997; Luck *et al.* 2001). La capacidad del paisaje natural para desempeñar estas funciones está determinada por su estructura, función y cambio (Turner 2005). Estas características pueden ser evaluadas mediante medidas cuantitativas o “métricas” de los patrones del paisaje que revelan diferentes aspectos de la función de los ecosistemas (O'Neill *et al.* 1988). De esta forma, la integración de la ecología del paisaje y la percepción remota puede ser muy útil para una evaluación exacta y oportuna de la dinámica y función del paisaje derivadas de los cambios en el uso y cobertura del suelo (Crews-Meyer 2002).

En este trabajo, se combinaron los enfoques de los estudios de cambio territorial con sistemas de percepción remota y los de evaluación de la dinámica del paisaje para entender la dinámica espacio temporal del paisaje periurbano en una ciudad localizada en la frontera México - Estados Unidos. Los efectos de la fragmentación en la estructura y función del paisaje,

derivados de la urbanización en esta zona, no se han analizado y comprendido de forma integral. Aun existe la necesidad de ampliar el entendimiento de sus alcances y repercusiones en el equilibrio del binomio sociedad naturaleza en la región. Por esta razón, el objetivo de este trabajo consistió en evaluar los cambios en la de ocupación del suelo y su expresión en la estructura del paisaje periurbano de esta zona, mediante la integración de los sistemas de percepción remota y la ecología del paisaje.

2. Datos y métodos de estudio

Para este estudio se utilizó un enfoque de clasificación supervisada basado en objetos para extraer categorías de uso y cobertura del suelo de imágenes de satélite de alta resolución de la zona de expansión urbana del área de estudio. Los resultados de esta clasificación se emplearon para detectar cambios significativos en las características del suelo ligadas al proceso de urbanización. Los cambios en la configuración espacial de las áreas de cambio se procesaron utilizando el enfoque de la ecología del paisaje para detectar alteraciones en la estructura y función del paisaje periurbano.

2.1 Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la zona de expansión urbana de Ciudad Juárez, Chihuahua, una localidad fronteriza ubicada en la ribera sur del Río Bravo, en las planicies septentrionales del Desierto Chihuahuense (Figura 1). Con una población de más de 1,300,000 habitantes y una superficie aproximada de 290 km², Ciudad Juárez es una de las ciudades más importantes de México. La condición impuesta por su localización estratégica en la frontera internacional con los Estados Unidos, convirtió a esta ciudad en lugar idóneo para la instalación de la industria maquiladora a través del Programa Nacional Fronterizo iniciado en la década de 1960 (Vargas Olmos 1995). Con esta actividad dominando su panorama económico por casi 50 años y con el cada vez más intenso fenómeno de la emigración hacia los Estados Unidos, Ciudad Juárez se ha convertido en un importante punto de atracción de mano de obra y emigrantes provenientes de los estados del sur de México. Se calcula que esta ciudad atrae a más de 20 mil personas cada año (INEGI 2005). El aumento de la población y la consecuente respuesta de los sectores público y privado para proveer los espacios productivos y residenciales necesarios para estos nuevos habitantes, ha propiciado un acelerado ritmo de crecimiento de la superficie urbana de Ciudad Juárez. Se estima que aproximadamente 450 hectáreas de tierra han sido incorporadas a la ciudad cada año desde el 2002. Este ritmo de crecimiento, a su vez, ha impuesto una enorme presión en las áreas desérticas periurbanas de la ciudad, propiciando una acelerada fragmentación del paisaje natural, no solo alrededor de esta, sino de muchas otras ciudades fronterizas en la región (Liverman y Breuing 1999).

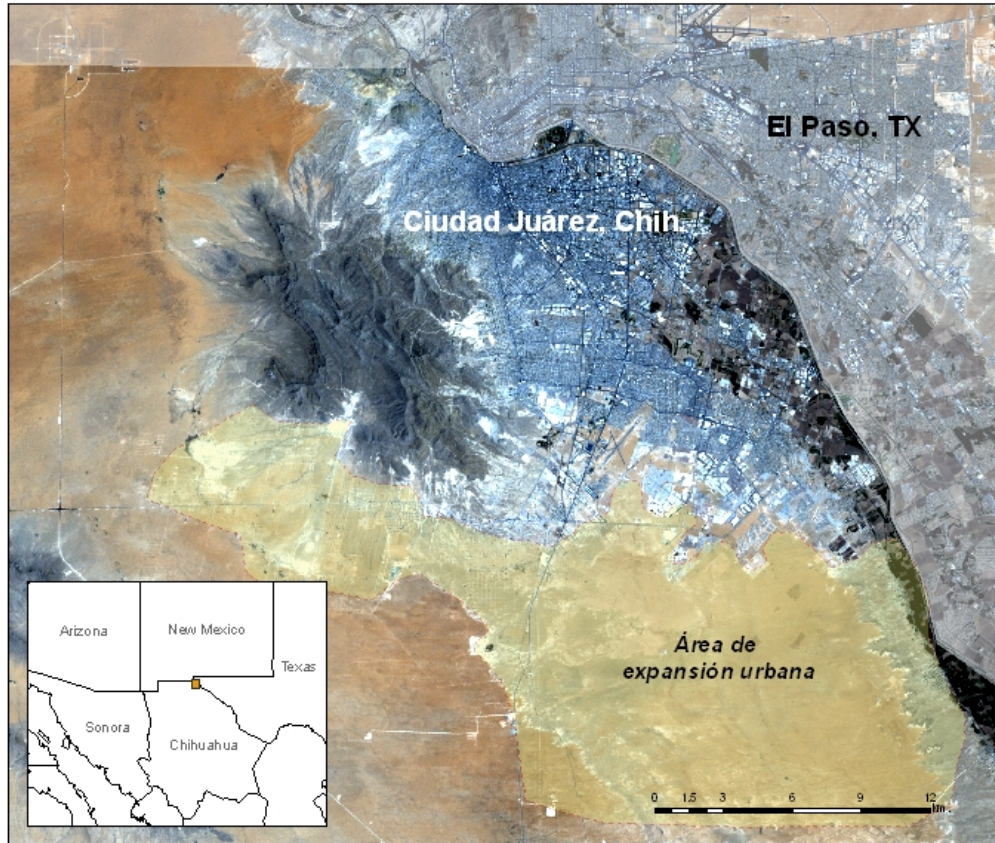


Figura 1 Localización de Ciudad Juárez, Chih. y su área de expansión urbana en la frontera norte de México sobre una imagen Landsat TM 2003.

2.2 Datos

La base de datos que se utilizó para el estudio consistió de un conjunto de imágenes multiespectrales de alta resolución de los sensores IKONOS y QuickBird capturadas en octubre de 2002 y agosto de 2007. Estas imágenes se procesaron geométricamente para asegurar la correspondencia espacial en los resultados de los análisis. Primero se construyó un mosaico con las escenas de cada fecha del área de estudio. Estas escenas de las dos fechas se co-registraron con un error medio cuadrático de 0.29 m. Ambas escenas fueron referenciadas en el sistema de coordenadas UTM de la zona 13 Norte, Datum WGS84. En el siguiente paso se aplicó un remuestreo para mejorar la resolución de despliegue de las bandas multiespectrales de 2.44 m a 0.7 m con la utilización de la banda pancromática (King y Wang 2001). Las diferencias en iluminación entre escenas se resolvieron aplicando el proceso de igualación de histogramas. Ya que no existieron parámetros para una corrección atmosférica absoluta, únicamente se aplicó una convolución genérica inversa de dispersión puntual para eliminar el efecto de bruma en la atmósfera.

2.3 Clasificación de uso y cobertura del suelo

Para extraer los diferentes tipos de uso y cobertura del suelo presentes en el área se aplicó una clasificación supervisada basada en objetos. Con este proceso, las imágenes se segmentaron en regiones homogéneas de cobertura de suelo formando objetos individuales. Debido a la alta resolución espacial de las imágenes y al alto número de regiones resultantes, fue necesario fusionar las menores a 120 m² para eliminar el posible ruido y obtener áreas más homogéneas y representativas fáciles de comparar entre las distintas fechas (Figura 2). Una vez segmentadas las imágenes, se calcularon los atributos espaciales, espectrales y texturales de las regiones para apoyar el proceso de clasificación. Esta clasificación se llevó a cabo con un algoritmo de selección de tres vecinos entrenado mediante una selección interactiva de muestras representativas de cada clase. La evaluación de exactitud se hizo con una muestra de 91 puntos de campo distribuidos aleatoriamente. Con los resultados de clasificación de ambas fechas se construyó un mapa de cambios de uso y cobertura del suelo del área de estudio.

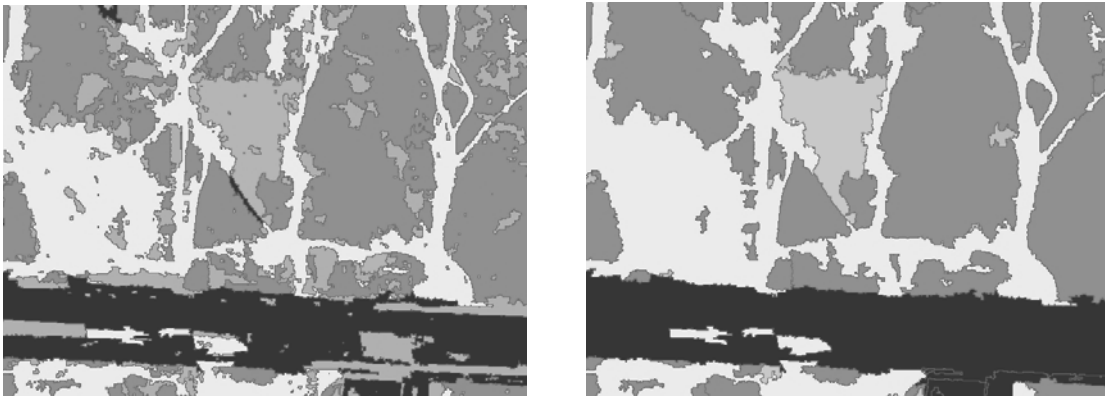


Figura 2 Generalización de de las regiones menores a 120m² para la homogeneización de áreas representativas

2.4 Evaluación de la configuración del paisaje periurbano

Las áreas de uso y cobertura del suelo obtenidas del proceso de clasificación se sometieron a un análisis de configuración espacial mediante métricas del paisaje calculadas en el programa Fragstats (McGarigal y Marks 1995). Las medidas de configuración espacial que se eligieron para esta análisis (Tabla 1) fueron aquellas que proveerían una idea de los efectos en la reconfiguración del paisaje periurbano, producto de los procesos de urbanización recientes en el área. A través de estas medidas fue posible, por ejemplo, medir el grado de fragmentación e integridad estructural del paisaje natural, para establecer una relación con la ocurrencia de alteraciones ambientales que podrían ser el resultado de tales cambios en el paisaje.

Tabla 1 Medidas de configuración espacial del paisaje seleccionadas de Fragstats para medir el grado de fragmentación e integridad estructural del paisaje periurbano en Ciudad Juárez, Chih. (Moficado de McGarigal y Marks 1995)

Métrica	Clave	Descripción
Densidad de regiones	DR	Mide el número de regiones por cada 100 hectáreas
Índice de la región más grande	IRG	Cuantifica el porcentaje de área total ocupado por la región más grande
Número de de regiones	NR	Mide la fragmentación del paisaje
Índice de contigüidad	CONTIG	Evalúa la contigüidad de las celdas dentro de una región
Índice de forma	FORMA	Mide la complejidad de la forma
Índice de contagio	CONTAG	Mide el nivel de compactación
Índice de división del paisaje	DIV	Mide la probabilidad de que dos celdas elegidas al azar no pertenezcan a la misma región
Índice de conectividad	CONNECT	Representa el porcentaje de conexiones funcionales entre regiones del mismo tipo dentro de un radio de 100 m

3. Resultados

La primera parte de los resultados consistió en el modelo de cambios del uso y cobertura del suelo producto del proceso de clasificación basada en objetos. La segunda parte estuvo integrada por los resultados del análisis de la dinámica del paisaje a través de las medias de configuración espacial.

3.1 Cambios en el uso y cobertura del suelo

En una primera aproximación se produjo un modelo de uso del suelo para cada año utilizando solamente la clase de uso natural y urbano con el fin de observar el comportamiento general en la dinámica del suelo durante el período de estudio. En el 2002, el 88% de los usos se clasificaron como de carácter natural, mientras que el 12% fueron urbanos. En el 2007 se revirtió la tendencia y el 43% del área de análisis estaba ocupada ya por usos de tipo urbano. Esto implica una disminución de casi el 50% en la cobertura natural del suelo y un aumento en el uso urbano a una tasa aproximada de crecimiento de 24 ha. por año, muy por debajo de la tasa de crecimiento estimada para toda la ciudad. Sin embargo, debido a su distribución discontinua, esta urbanización del suelo muestra una clara fragmentación de las unidades de paisaje natural consolidadas en la primera fecha de análisis.

En una segunda clasificación más detallada se identificaron los siguientes usos y coberturas del suelo para cada fecha: Matorral, Matorral disperso, Área verde, Suelo seco, Suelo

húmedo, Agua, Pavimento, Residencial e Industrial (Figura 3). Debido a la diversidad y mezcla de los materiales urbanos presentes en el área de estudio, estas clases se generalizaron para facilitar la interpretación de las clases. La comparación de estas dos fechas permitió detectar cambios importantes en la ocupación del suelo.



Figura 3 Clasificaciones del uso y cobertura del suelo de una porción del área de estudio derivadas de las imágenes IKONOS 2002 y QuickBird 2007.

La exactitud de las clasificaciones generadas se evaluó utilizando el conjunto de puntos de verificación de campo. En esta evaluación, la clasificación del 2002 se produjo con una exactitud del 83.4% y la del 2007 de 78% (Tabla 2). Aunque para el segundo año se observa una disminución en la exactitud, producto del aumento de complejidad en la distribución de los usos y coberturas, estos resultados aun superan a los que arrojaron pruebas de clasificación que realizaron previamente basadas solamente en atributos espectrales.

Tabla 2 Matriz de evaluación de exactitud de la clasificación de uso y cobertura del suelo de 2007

Clasificación	Control de campo										Total	EU	EC
	Suelo húmedo	Suelo seco	Área verde	Industrial	Pavimento	Residencial	Matorral	Matorral disperso	Agua				
Suelo húmedo	5	1	0	0	0	0	0	0	1	7	71.4%	28.6%	
Suelo seco	1	7	0	1	0	0	0	0	0	9	77.8%	22.2%	
Área verde	0	0	4	0	0	0	0	0	0	4	100.0%	0.0%	
Industrial	0	0	0	6	1	1	0	0	0	8	75.0%	25.0%	
Pavimento	1	0	0	1	8	1	0	0	0	11	72.7%	27.3%	
Residencial	0	0	0	1	1	11	0	0	0	13	84.6%	15.4%	
Matorral	0	1	1	0	0	0	14	3	0	19	73.7%	26.3%	
Matorral disperso	0	2	0	0	0	0	1	12	0	15	80.0%	20.0%	
Agua	1	0	0	0	0	0	0	0	4	5	0.0%	100.0%	
Total	8	11	5	9	10	13	15	15	5				
EP	62.5%	63.6%	80.0%	66.7%	80.0%	84.6%	93.3%	80.0%	80.0%				
EO	37.5%	36.4%	20.0%	33.3%	20.0%	15.4%	6.7%	20.0%	20.0%				

Los resultados de la clasificación muestran un aumento considerable en los usos de tipo urbano principalmente Pavimento y Residencial y una reducción importante de las áreas de Matorral entre 2002 y 2007 (Figura 5). Otro cambio notable fue el aumento en las áreas de suelo expuesto, debido a la apertura de nuevos espacios en proceso de ocupación por desarrollo residenciales. Otra modificación observada es el aumento de las áreas de matorral disperso, probablemente como repuesta a la ocurrencia de años secos anteriores a 2007.

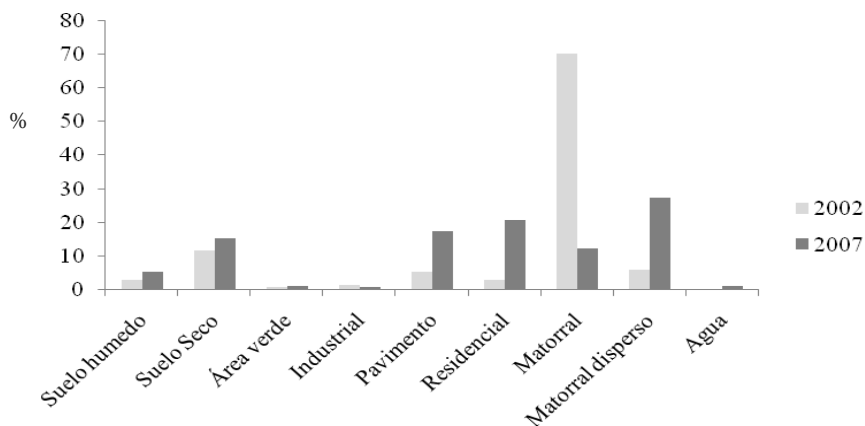


Figura 4 Porcentajes de uso y cobertura del suelo de las clasificaciones del 2002 y 2007 en el área de estudio.

3.2 Dinámica del paisaje periurbano

Las medidas de configuración espacial de las regiones de uso y cobertura del suelo natural y urbano, producto de la primera aproximación, muestran un aumento en la fragmentación del paisaje periurbano en un área específica de observación (Tabla 3). Esta tendencia puede observarse claramente, por ejemplo, a través del aumento en casi 400% en el número de regiones (NR) ocurrido entre ambas fechas. Esto es evidencia del intenso proceso de apertura de áreas de matorral desértico para el desarrollo de nuevos complejos residenciales que ocurrió y sigue ocurriendo en el área. De la misma forma, la densidad de regiones (DR) se incrementó de 74.5 a 193.2 por cada 100 ha. El índice de contigüidad (CONTIG), que representa la conexión espacial entre las celdas de una misma región disminuyó en 27.0%. Esto podría confirmar el patrón de apertura de nuevas áreas urbanas y a la vez revelar deficiencias en el umbral de eliminación de regiones pequeñas aplicado luego del proceso de clasificación.

Tabla 3 Medidas de configuración espacial del paisaje periurbano en 2002 y 2007

Año	NR	DR	CONTIG	FORMA	CONTAG	DIV	CONECT
2002	283	74.5	0.85	2.16	70.23	0.62	9.14
2007	717	193.2	0.58	2.28	41.18	0.77	3.11

La complejidad en la forma de las regiones (FORMA) también mostró un pequeño incremento debido a la apertura de nuevos espacios residenciales y a la compleja mezcla de coberturas presentes en estas áreas. El nivel de compactación de las regiones medido por el Índice de contagio (CONTAG) disminuyó considerablemente, sobre todo debido al efecto de las nuevas avenidas que dividen las grandes regiones naturales en la clasificación de 2007. El índice de conectividad (CONNECT) que representa el porcentaje de uniones funcionales entre las regiones de un mismo tipo disminuyó también de para el 2007, lo que se confirma por el incremento del 17% en el índice de división del paisaje (DIV).

La fragmentación del paisaje periurbano detectada mediante este análisis tiene diferentes implicaciones, la mayoría de ellas aun no evaluadas a profundidad. Por ejemplo, la remoción de la cobertura vegetal y la alteración de las condiciones topográficas para la apertura de nuevas áreas residenciales, sin la infraestructura apropiada, podría alterar las condiciones de escurrimiento superficial y aumentar la vulnerabilidad a los riesgos por inundación. Esto se confirma mediante la presencia de áreas inundadas que se detectaron en la imagen del 2006 como una nueva clase, confinadas por avenidas y alteraciones del terreno para el desarrollo residencial e industrial. Desde la perspectiva ecológica, un aumento en la fragmentación del paisaje periurbano podría afectar funciones vitales de los ecosistemas como el intercambio de materia y nutrientes, los procesos de formación de suelo, la preservación de cadenas tróficas y la provisión de hábitats a pequeñas especies. Sin embargo, para confirmar dichos efectos de la fragmentación del paisaje se requiere de estudios empíricos a diferentes escalas que complementen la evaluación.

4. Conclusiones

El uso y la cobertura del suelo en la zona de expansión urbana de Ciudad Juárez sufrieron cambios importantes en el periodo 2002 - 2007. El cambio más notable fue el aumento de los usos de tipo urbano, ocurrido un tercio del área a través de la aparición de pequeñas regiones desconectadas que provocaron un incremento de la fragmentación en el paisaje periurbano. Esta tendencia fue confirmada por diferentes medidas de configuración espacial del paisaje seleccionadas para el estudio. Algunos de los efectos de esta fragmentación podrían estar vinculados con la ocurrencia de problemas ambientales y con la alteración de funciones ecológicas esenciales. Este estudio muestra un enfoque de integración de los sistemas de percepción remota y la ecología del paisaje para ayudar al mejor entendimiento de las relaciones entre los cambios en el uso y cobertura del suelo y la dinámica del paisaje en las áreas de expansión urbana.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por la beca de apoyo a la reincorporación de ex-becarios PROMEP UACJ-EXB-164 y los Proyectos de Fortalecimiento Institucional de la UACJ 2005-1003 y 2008-1104.

Referencias

Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, 253-260.

Crews-Meyer, K. A. (2002). Characterizing landscape dynamism using paneled-pattern metrics. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* , 68, 1031-1040.

Forman, R. T., & Gordon, M. (1986). Landscape ecology. Wiley: New York.

INEGI. (2005). II Censo de Población y Vivienda. Aguascalientes, Méx.

King, R., & Wang, J. (2001). A wavelet based algorithm for pan sharpening Landsat 7 imagery.

Lambin, E. F., and Strahler, A. H. (1994). Indicators of land-cover change for change vector analysis in multitemporal space at coarse spatial scales. *International Journal of Remote Sensing* , 15, 2099-2119.

Lee, K., (2007). An urbanizing world, in O'Meara, S. M. et al.,. 2007 State of the World. Our urban future, The World Watch Institute, W. W. Norton & Company: New York

Liverman, D., & Breuing, L. (1999). Land use change and climate change in the greater Chihuahuan Desert Ecoregion. World Wild Life Fund, Tucson, AZ.

Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E., & Moran, E. (2004). Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 2365-2470.

Luck, M., Jenerette, G., Jianguo, W., & Grimm, N. (2001). The urban funnel model and the spatially heterogeneous ecological footprint. *Ecosystems*, 4 (8), 782-796.

McGarigal, K., & Marks, B. (1995). Fragstats: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, OR.

O'Neill, R., Krumme, J., Gardner, R., Sugihara, G., Jackson, B., DeAngelis, D., et al. (1988). Indices of landscape patterns. *Landscape Ecology*, 1(3), 153-162.

PRONATURA. (2002). Ecoregional conservation assessment of the Chihuahuan Desert. Pronatura, TNC, WWF.

Rindfuss, R. R., Walsh, S. J., Fox, J., & Mishra, V. (2005). Developing a science of land change: Challenges and methodological issues. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101, pp. 13976-13981.

Turner, M. G. (2005). Landscape Ecology: What is the state of the science. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 36, 319-344.

Turner, M. G., Gardner, R. H., & O'Neill, R. V. (2001). *Landscape ecology in theory and practice: Pattern and process*. Springer, New York.

UN-HABITAT (2003), Programa de Indicadores Urbanos, Fase III, y Organización de las Naciones Unidas, *Perspectivas de urbanización en el mundo: revisión 2003*.

Watson, R. T., Noble, I. R., Ravindranath, N. H., Verardo, D. J., & Dokken, D. J. (2000). *Special report on land use, land-use change and forestry*. Intergovernmental Panel on Climate Change.