
Evaluación espacio-temporal del impacto del crecimiento urbano sobre la cobertura vegetal en la región fronteriza Nogales, México y Arizona, Estados Unidos, durante el periodo 1995-2010.

J.O. Loya-Carrillo*, S.A. Aguilar-Estrada¹, L.C. Bravo-Peña¹ y E. Sánchez-Flores²

¹ Universidad Autónoma de Ciudad Juárez Unidad Multidisciplinaria Cuauhtémoc, Calzada Morelos y Privada del Roble #101, Frac. El Roble, C.P. 31500, Tel y Fax 016251121719, Cuauhtémoc, Chihuahua.

² Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Av. Plutarco Elías Calles #1210, Col. Fovissste Chamizal, C.P. 3231, Tel y Fax 016566882100, Ciudad Juárez, Chihuahua.

Spatiotemporal impact assessment of urban growth of the vegetation cover in the border region Nogales, Mexico and Arizona, USA, from 1995 and 2010.

Abstract

Studies about land change and land cover allow trends and reveal the processes of deforestation, degradation, desertification and loss of biodiversity in a specific region. To quantify the degree of environmental conversion, a reliable way is through study the spatiotemporal dynamics of different land covers, this allows inferring and clarify some of the most notorious anthropogenic process on the Earth's surface, and if taken in consider the use of remote sensing techniques and technologies as geographic information systems, characterize these processes may become a practical and accurately task. In this context, the aim of this study is to assess the impacts of population growth on the vegetation cover an arid region of northern Mexico and southern United States (Both Nogales), in the period 1995-2010, at intervals 5 years. To achieve this objective is used images from sensor Landsat 5 TM, which were atmospherically corrected and then generate maps of land use and land cover in the study area, the years considered were: 1995, 2000, 2005 and 2010. The distinguished classes were urban, agricultural, forest, mountain scrub, bare soil and water. Mapping was validated for 2010 year, obtaining a Kappa value of 0.83. With above, were obtained transition matrix and probability matrix, which allowed discovering significant changes associated with urban growth and that within 20 years increased by 284.41% over the original surface, while forest and scrub vegetation cover decreased by 22.69% i.e. of 24057.2 to 18596.45 ha in the same time. It can be seen as urban land use is causing a negative impact on various natural hedges, mainly on the bare soil avoiding the coating vegetal, growing over the mountain shrubs. One of the most interesting results that indicate the change matrix is the conversion of forested areas to mountain scrub, a type of secondary vegetation resulting from human action in places with great disturbance, there are also differences in the impact of urban growth on both sides of the border, it is difficult to enumerate, however, one can conclude that the evolution of urban land use is on the rise, while the evolution of forest class decreases. These differences can and should be the subject of future evaluation tools such as landscape ecology, change prediction models or other, in order to establish more clearly the human impacts and trends of environmental degradation caused by the conversion of land use.

Key words: land use and land cover, Landsat TM 5, remote sensing, matrix of change, Kappa.

Resumen

Los estudios sobre cambio y cobertura de uso de suelo permiten conocer las tendencias de los procesos de deforestación, degradación, desertificación y pérdida de la biodiversidad de una región específica. Para cuantificar el grado de conversión ambiental, una manera confiable consiste en el estudio de la dinámica espacio-temporal de las distintas coberturas de suelo, esto permite inferir y esclarecer algunos de los procesos

*Autores de correspondencia
Email: jimmy_9108@hotmail.com

antropogénicos más notorios sobre la superficie terrestre, además, si se toma en cuenta el uso de técnicas de sensoria remota y tecnologías como los sistemas de información geográfica, caracterizar dichos procesos se puede tornar una tarea práctica y precisa. En este contexto, el objetivo de este trabajo consiste en evaluar los impactos del crecimiento demográfico sobre la cobertura vegetal en una región árida del norte de México y Sur de los Estados Unidos (Ambos Nogales), en el periodo de 1995 a 2010, en intervalos de 5 años.

Para lograr el objetivo planteado se utilizaron imágenes satelitales del sensor Landsat 5 TM, las cuales, se corrigieron atmosféricamente y posteriormente se generaron cartografías de uso y/o coberturas de suelo en el área de estudio, los años considerados fueron 1995, 2000, 2005 y 2010, distinguiendo entre las clases: urbano, agrícola, bosque, matorral de montaña, suelo desnudo y agua. Se validó la cartografía correspondiente al año 2010 obteniendo un valor de Kappa de 0.83. Con lo anterior fue posible obtener matrices de transición y probabilidad de cambio, lo cual, permitió descubrir cambios significativos asociados al crecimiento urbano, ya que en un lapso de 20 años se incrementó un 284.41% sobre la superficie original, mientras que las coberturas vegetales bosque y matorral disminuyeron en un 22.69% es decir, pasó de 24057.2 a 18596.45ha en el mismo periodo de tiempo. Se puede apreciar cómo el uso de suelo urbano está generando un impacto negativo sobre diversas coberturas naturales, principalmente sobre la cubierta vegetal, es decir bosque y matorral. Sin embargo, uno de los resultados más interesantes que las matrices de cambio señalan, es que la superficie de bosque se está convirtiendo principalmente en matorral de montaña, un tipo de vegetación secundaria resultante de la acción antrópica que se establece en lugares con gran perturbación, además existen diferencias del impacto del crecimiento urbano en ambos lados de la frontera, esto resulta difícil de enumerar, sin embargo, se puede mencionar que la evolución del uso de suelo urbano va en incremento, mientras que la evolución de la clase bosque disminuye. Estas diferencias pueden y deben ser objeto de evaluaciones futuras con herramientas como ecología del paisaje, predicción con modelos de cambio u otras, para poder establecer con mayor claridad los impactos humanos y las tendencias de deterioro ambiental provocado por la conversión de usos del suelo.

Palabras clave: cambio en uso de suelo, Landsat TM 5, sistemas de percepción remota, matrices de transición, Kappa.

Introducción

Los estudios sobre cambio y cobertura de uso de suelo, actualmente son el centro de atención de la investigación ambiental (Bocco *et al.*, 2001), como tal permiten asentar las bases para conocer las tendencias de los procesos de deforestación, degradación, desertificación y pérdida de la biodiversidad de una región específica (Velázquez *et al.*, 2002). Durante el proceso de cambio, es común que ocurran una serie de fenómenos naturales tales como los huracanes, terremotos o algún otro evento que afecte considerablemente el uso y/o cobertura de suelo, sin embargo, actualmente las actividades humanas son las principales responsables de desencadenar estos efectos (Vitousek *et al.*, 1997). Es importante hacer énfasis en el crecimiento acelerado de la población mundial, ya que a ello se le atribuyen una serie de elementos que contribuyen en gran medida el cambio de uso y/o cobertura de suelo, por citar algunas: el desmonte de áreas forestales para

generar espacios donde sembrar cultivos o crear zonas habitacionales, la substracción excesiva del agua contenida por los mantos acuíferos, lo que propicia la alteración de los ecosistemas al agotar los recursos hídricos.

Una manera confiable para cuantificar el grado de conversión ambiental, es el estudio de la dinámica espacio-temporal de las distintas coberturas de suelo (Priego *et al.*, 2004), con esto, es posible inferir y esclarecer algunos de los procesos antropogénicos más notorios sobre la superficie terrestre, y si se toma en cuenta el uso de tecnologías como sensoria remota y sistemas de información geográfica, caracterizar dichos procesos se puede tornar una tarea práctica y precisa. Por lo tanto a través de las herramientas anteriormente mencionadas, se pretende evaluar el proceso de cambio de uso y/o cobertura de suelo para la región fronteriza Nogales, México y Arizona, Estados Unidos.

El objetivo general de este trabajo se subdivide en los siguientes objetivos específicos:

- Obtener imágenes del sensor Landsat TM5, perteneciente región fronteriza Nogales, México y Arizona, Estados Unidos existentes en el sitio WEB de GLOVIS por el Sistema Geológico de los Estados Unidos.
- Generar una clasificación supervisada con seis diferentes clases de uso y/o cobertura de suelo.
- Evaluar la fiabilidad de la clasificación mediante matrices de confusión y parámetros cuantitativos como fiabilidad global, exactitud del productor, exactitud del usuario, error de omisión, error de comisión e índice Kappa.
- Establecer el grado de conversión ambiental de la dinámica espacio-temporal en los distintos usos y cobertura de suelo utilizando matrices de cambio inter-anual.

Materiales y método

Área de estudio

El área de estudio que comprende la región fronteriza Nogales, México y Arizona, Estados Unidos, se encuentra contenida por las coordenadas geográficas extremas 31° 27' y 31°13' de latitud norte y los -111° 00' y -110° 53' de longitud oeste, a una altitud de 1,200 m sobre el nivel del mar (Figura 1). Durante el estudio se contempló una superficie total de 28,185.3 ha. El clima que se presenta en ambos Nogales suele ser extremo, de tipo desértico y templado sub-húmedo, con temperaturas que oscilan en entre los -3 y 35 °C (García, 1998).

El área fronteriza de Nogales, México se caracteriza por el establecimiento de maquiladoras que mueven gran parte del capital que se produce en la región, sin embargo, la producción de ganadería (cría de bovinos en su mayoría) es otra actividad económica con gran presencia en el lugar (Camou; 1994, 1998), mientras que para Nogales Arizona, el intercambio comercial con la ciudad vecina y el desarrollo agroindustrial, son la principal fuente de recursos financieros.

En la extensión territorial de ambos Nogales predomina principalmente la vegetación de tipo pastizal, ya sea natural o inducido. Además es posible encontrar en algunas partes de la región bosque de encino, que de igual forma se encuentra distribuido en cinturones y parches adyacentes de la zona urbana. Por otro lado, el matorral de desierto y en menor grado la agricultura de riego, son dos tipos de cobertura de suelo que también tienen

presencia en el lugar.

Tratamiento de imágenes

En el presente trabajo se evaluó la dinámica espacio-temporal de los diferentes usos y/o coberturas de suelo en el municipio de Nogales, Sonora a través del software de procesamiento de imágenes Idrisi Taiga. Durante el proceso se utilizaron 4 imágenes Landsat TM pertenecientes a los años 1995, 2000, 2005 y 2010, las cuales fueron tratadas mediante un proceso de corrección atmosférica. La corrección atmosférica convierte los números digitales de la imagen a valores de reflectividad, para ello, se utilizó el software Idrisi el cual ejecuta un módulo llamado *Atmosc*, que además requiere parámetros de entrada procedentes del archivo de cabecera que incluyen las imágenes. Este proceso mejora los resultados de una clasificación de imágenes al minorar los efectos de la atmósfera.

Análisis de separabilidad de firmas espectrales

Para darle mayor solidez a los resultados, se generó un análisis de separabilidad espectral para verificar que realmente las clases que se manejen, sean espectralmente diferentes unas de otras. Para esto, es necesario digitalizar áreas de entrenamiento, proceso en el cual se entrena al programa para identificar las clases que se desean caracterizar, ayudando a discriminar entre un tipo de cobertura y otro. Las clases utilizadas durante el trabajo fueron: urbano, agrícola, bosque, matorral de montaña y agua (Tabla 1).

Para este fin, se eligió el método de *Divergencia Transformada (DT)*, ya que ha mostrado mejores resultados en comparación con otros como el de *Bhattacharayya* y el de la *divergencia* (García y Francois, 2008). Por lo tanto, se manejó la escala mostrada en la tabla 2 tomada de PCI Geomatics (2011).

Clasificación espectral

Se obtuvo una clasificación supervisada de los usos y coberturas de suelo a través del algoritmo de máxima probabilidad, uno comúnmente utilizado (García y Francois, 2008) pero de gran ayuda para establecer el grado conversión ambiental. Durante este proceso, se definen áreas de entrenamiento, que ayudan al programa en el reconocimiento de distintas categorías. En otras palabras, a partir de las categorías obtenidas, se caracterizan cada una de las

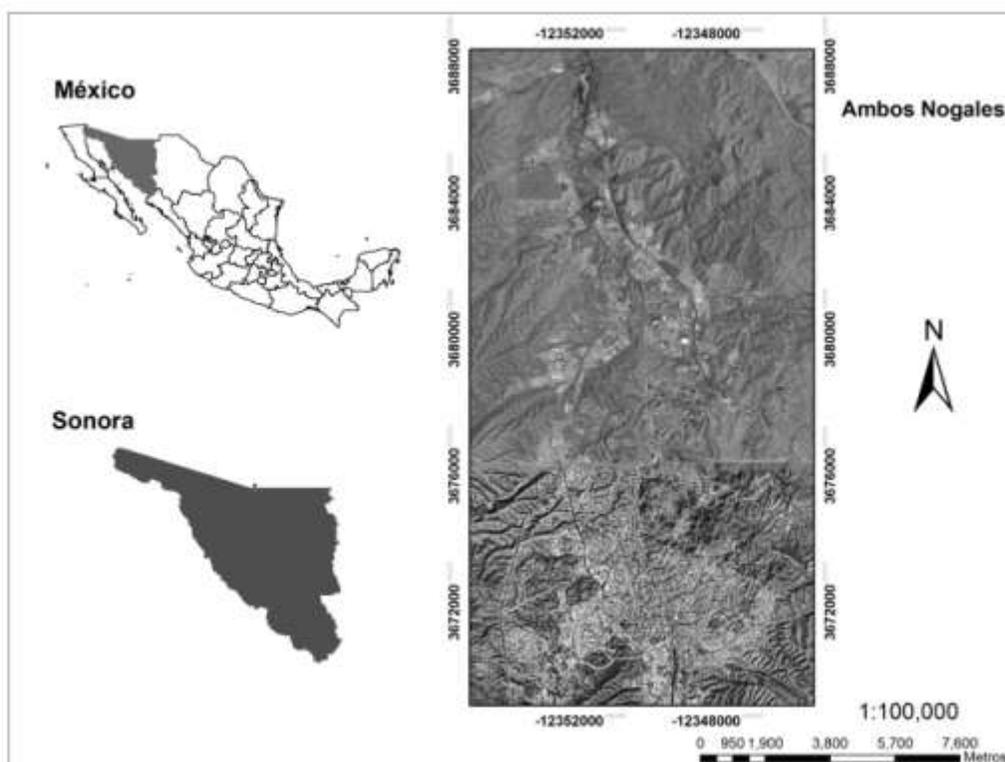


Figura 1. Localización del área de estudio, ambos Nogales.

Tabla 1. Descripción de las clases utilizadas.

Id	Clase	Descripción
1	Urbano	Toda zona o lugar donde exista cualquier edificación construida por el ser humano.
2	Agrícola	Zonas donde se labra o cultiva la tierra e incluye todos los trabajos relacionados al tratamiento del suelo y a la plantación de vegetales.
3	Bosque	Área que presenta una importante densidad de árboles o bien cerca del 100% de cobertura.
4	Matorral	Se caracteriza por vegetación dominada por arbustos pequeños.
5	Suelo desnudo	Suelos en los que no existe ningún tipo de vegetación o edificación.
6	Agua	Zonas mayormente oscuras en una imagen Landsat, con los valores de respuesta espectral más bajos.

Tabla 2. Grado de separabilidad espectral de acuerdo al índice de divergencia transformado.

Índice de divergencia transformada	Grado de separabilidad
0 - 1000	Muy pobre
1000 - 1900	Pobre
1900 - 2000	Buena

(Tomado de PCI Geomatics, 2011)

clases, lo que permite asignar posteriormente al resto de los píxeles de la imagen a una de esas categorías, en función de la similitud de sus Números Digitales (NDs) con los extraídos como referencia (Chuvieco, 2008).

Evaluación de la fiabilidad

La confiabilidad de la clasificación se evaluó a partir de una matriz de confusión, la cual permite además obtener los siguientes parámetros: fiabilidad global, precisión del productor, precisión del usuario, error de comisión, error de omisión e índice

Kappa (Richards, 1996; Liu *et al.*, 2007; Berlanga *et al.*, 2010).

Para el caso de este documento, únicamente se validó mediante los parámetros mencionados anteriormente la clasificación de usos y coberturas de suelo correspondiente al año 2010, tomando como datos de referencia las imágenes contenidas en el software Google Earth y siguiendo lo propuesto por Congalton (1991), quien sugiere al menos 50 puntos de muestreo por categoría, y de 75 a 100 si el área en estudio es superior a 400000 ha o si hay más de 12 categorías. Por lo tanto se utilizaron 300 puntos de control elegidos mediante el método de muestreo aleatorio simple, en el cual todos los sitios de verificación tienen la misma probabilidad de seleccionados, pero corriendo el riesgo de contar con superficies grandes poco representadas o viceversa, es decir superficies pequeñas muy representadas, o inclusive pueden llegar a estar ausentes de la muestra (Francois *et al.*, 2003).

La exactitud total de una clasificación puede ser evaluada a través de un estimador del coeficiente Kappa, una técnica discreta multivariada que determina estadísticamente si una matriz de error es significativamente diferente de otra (Berlanga y Ruiz, 2002). El resultado de Kappa es el más significativo, ya que partir de cierto valor, permitirá aceptar o rechazar la clasificación de usos y coberturas de suelo obtenidas. Varias fuentes bibliográficas reportan que a partir de un valor de 0.8 en adelante de Kappa, se podrá aceptar la clasificación. Sin embargo esto es algo difícil de obtener y para lograrse se requiere de un tratamiento exhaustivo para las imágenes.

Para el caso de las clasificaciones de los años 1995, 2000 y 2005, se añadieron un gran número de áreas de entrenamiento, las cuales fueron definidas por fotointerpretación.

Grado de conversión ambiental

Para finalizar, una vez aceptadas las clasificaciones, se estimó el grado de conversión ambiental a través de matrices de cambio inter-anales, en este caso se realiza un análisis comparativo del cambio de las superficies en los periodos 1995- 2000, 2000-2005, 2005-2010, además se obtuvieron las matrices de probabilidad de cambio mediante la siguiente ecuación propuesta por Mendoza *et al.* (2002):

$$(1)$$

Donde S_{ij} es la superficie de "ij" de la matriz de transición de cobertura/uso de suelo en el tiempo uno y " S_j " la superficie de la clase de cobertura/uso de suelo "j" en el tiempo dos. Al final, $P_{ij} = 1$.

En la figura 2, es posible observar detalladamente la secuencia metodológica seguida durante la elaboración de este trabajo, además indica con claridad qué comandos se utilizaron dentro del software de procesamiento de imágenes y qué software auxiliar permitió que se obtuviera las matrices de cambio y coeficientes de fiabilidad correspondientes

Resultados

A partir de las imágenes Landsat 5 TM, obtenidas a través del servidor del Servicio Geológico de los Estados Unidos (GLOVIS), se lograron generar mapas de uso y coberturas de suelo para los años 1995, 2000, 2005 y 2010, por el método de máxima verosimilitud. Estas cartografías corresponden a las figuras 3, 4, 5 y 6.

Durante la validación de la cartografía de cobertura y uso de suelo del año 2010, se obtuvo un valor de precisión global del 88.67%, este valor indica la proporción de los sitios de verificación correctamente clasificados en una cartografía.

Resulta de dividir la diagonal principal de una matriz de confusión con el número total de sitios de verificación. El valor de fiabilidad global indica la probabilidad para cualquier sitio en el mapa de ser correctamente clasificado (Francois, 2003).

Mientras que el índice Kappa, un parámetro importante dado que es un coeficiente utilizado como parámetro de calidad. A diferencia del índice de fiabilidad global, el cual toma únicamente en consideración los valores existentes en la diagonal principal, el índice Kappa evalúa las distribuciones marginales (error de omisión y comisión) en una matriz de confusión (Tabla 3).

Este índice da cuenta de la contribución del azar en la confiabilidad del mapa y como resultado se obtuvo un valor de 0.83, los que permitió aceptar la cartografía. Esto permitió generar una tabla que resume las transiciones por clase (Tabla 4), a partir de la cual se creó la figura 7, la cual muestra un perfil de comportamiento por clase al identificar los cambios más abruptos en los diferentes usos y coberturas de suelo.

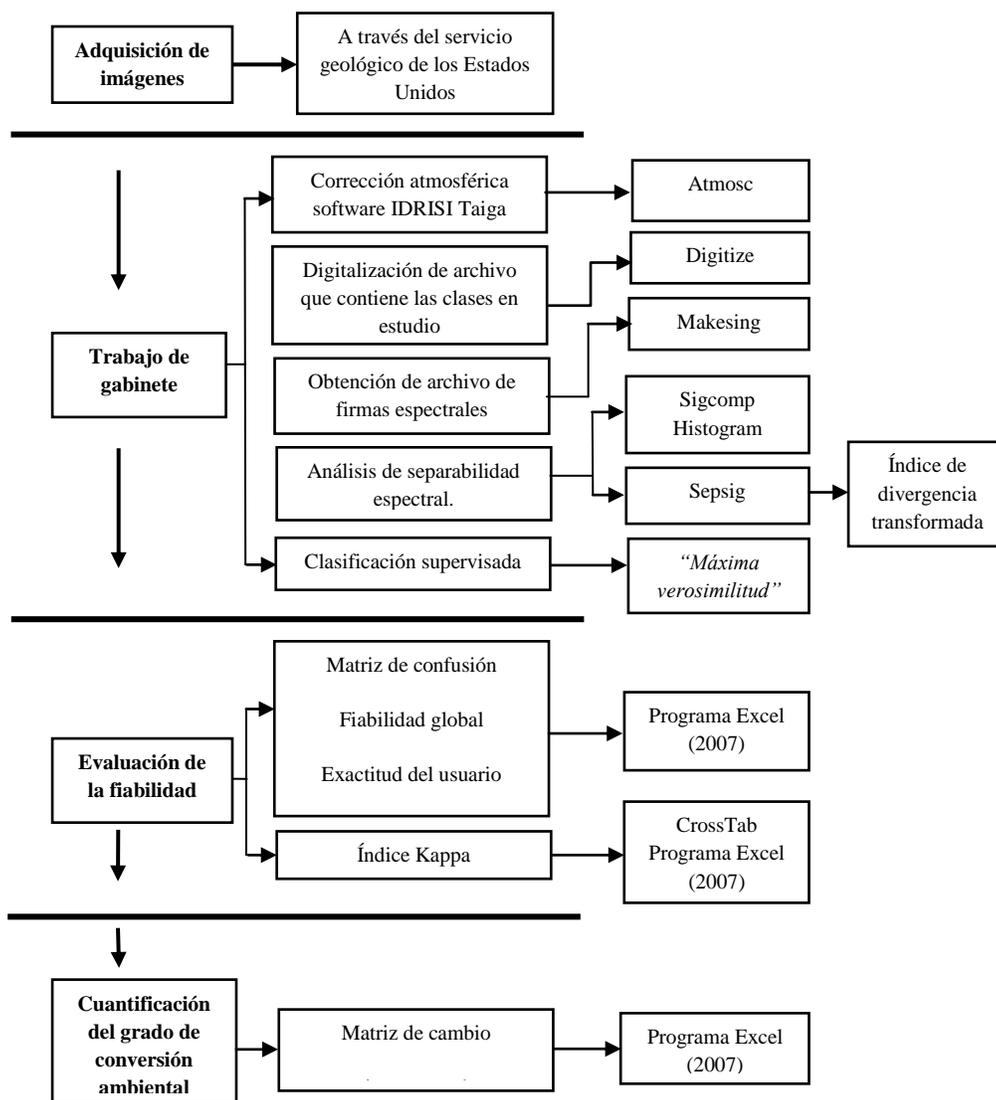


Figura 2. Secuencia metodológica, para la evaluación de cambio de cobertura y uso de suelo.

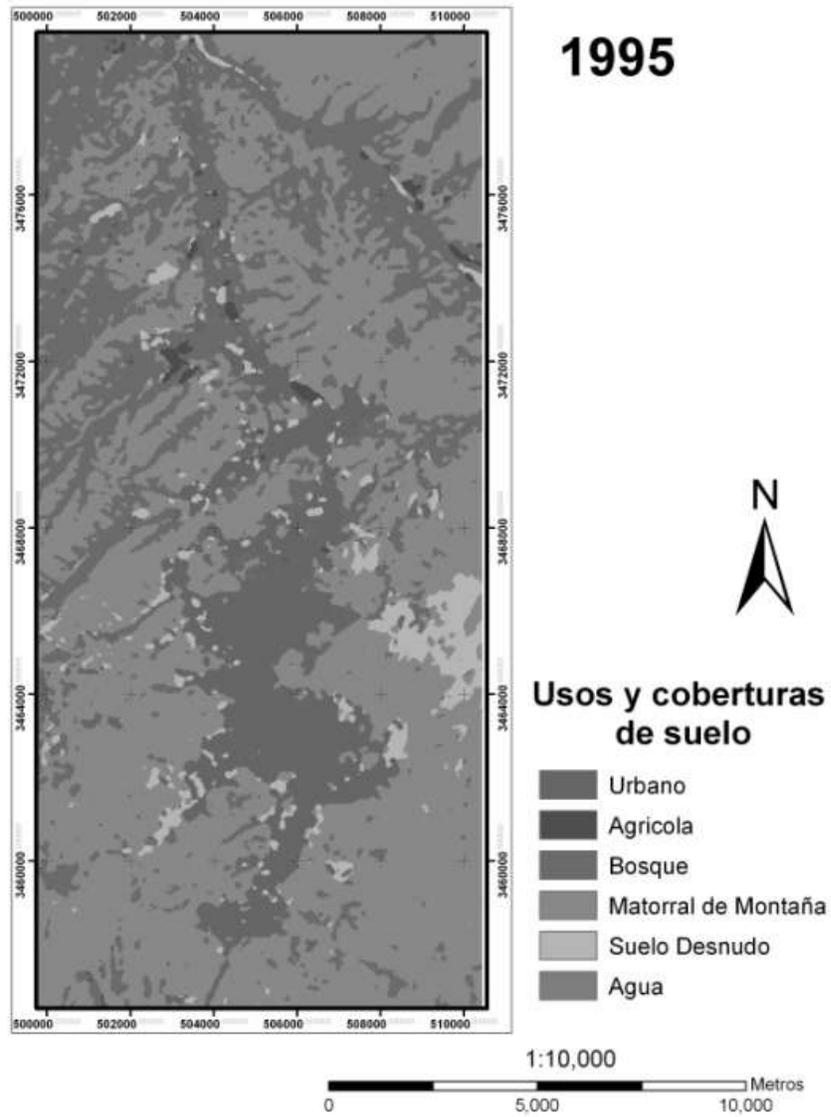


Figura 3. Clasificación supervisada para ambos Nogales en el año 1995.

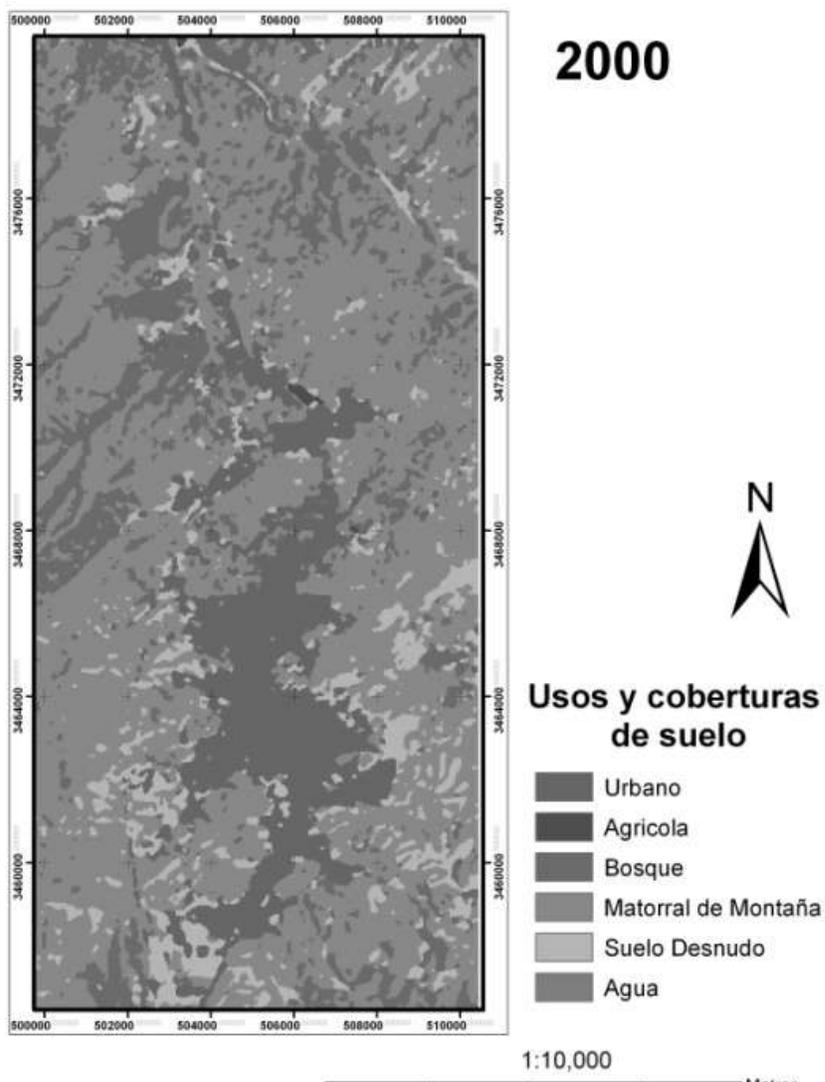


Figura 4. Clasificación supervisada para ambos Nogales en el año 2000

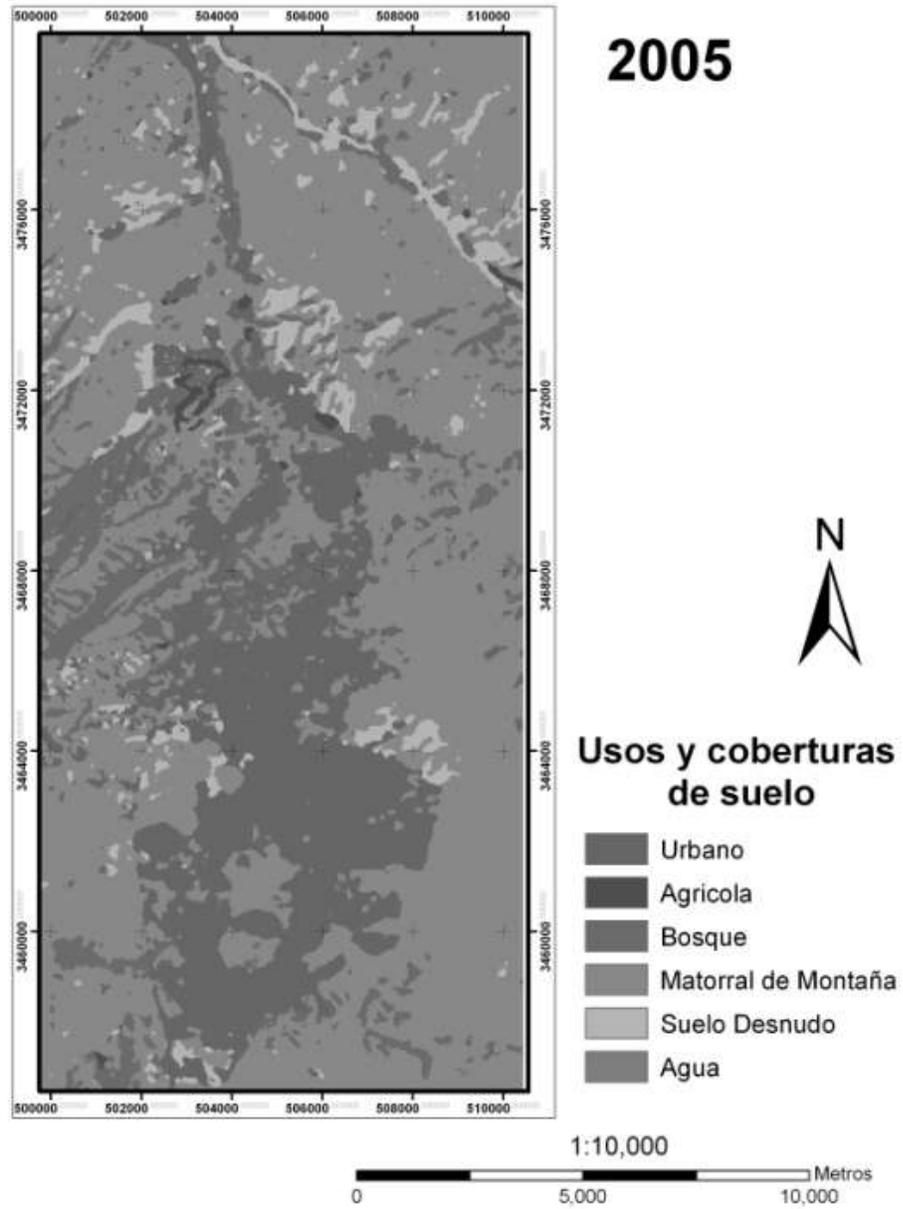


Figura 5. Clasificación supervisada para ambos Nogales en el año 2005.

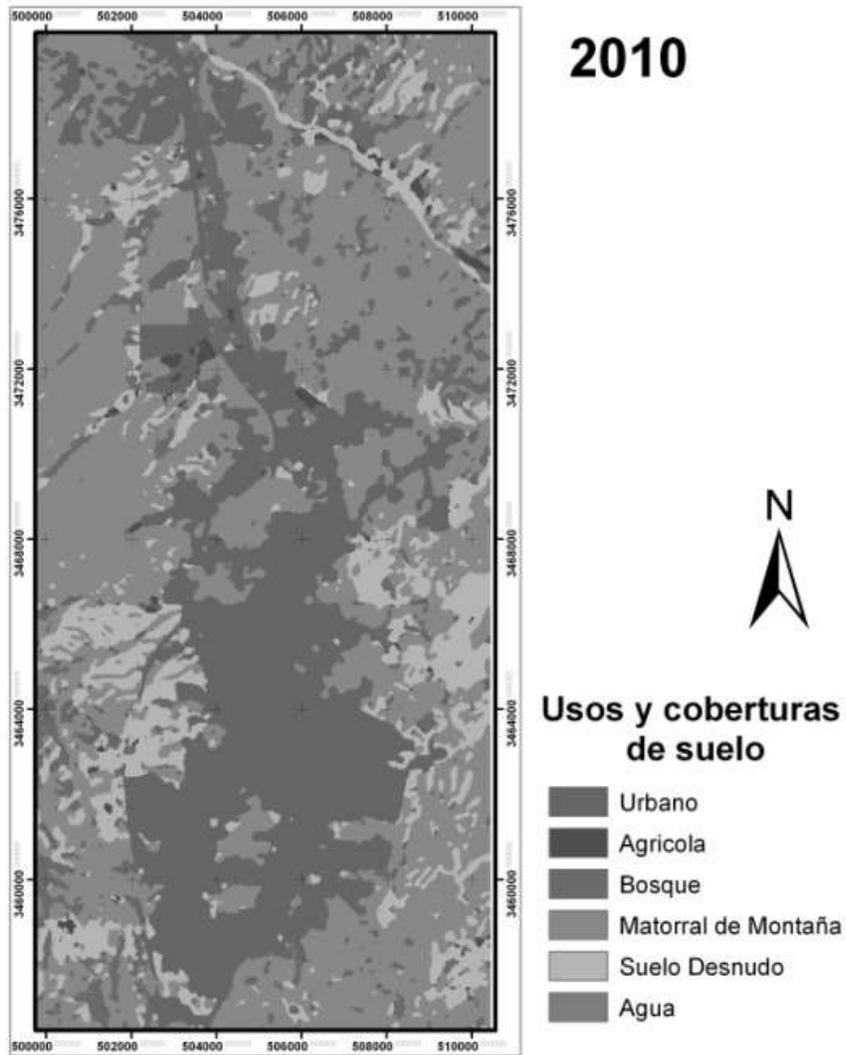


Figura 6. Clasificación supervisada para ambos Nogales en el año 2010.

Tabla 3. Matriz de error para el mapa temático de cobertura y uso de suelo de Nogales, Sonora-Arizona del año 2010.

Datos de referencia	Urbano	Agrícola	Bosque	Matorral de montaña	Suelo desnudo	Agua	Total
Urbano	72	1	9	0	0	0	82
Agrícola	0	0	5	0	0	0	5
Bosque	0	0	32	6	0	0	38
Matorral de montaña	0	0	0	135	13	0	148
Suelo desnudo	0	0	0	0	26	0	26
Agua	0	0	0	0	0	1	1
Total	72	1	46	141	39	1	300
Exactitud del productor por clase en %	100	0	69.57	95.74	66.67	100	100
Exactitud del usuario por clase en %	87.8	0	84.21	91.22	100	100	87.8
Error de omisión por clase	0	1	0.3	0.04	0.33	0	0
Error de comisión por clase	0.12	1	0.16	0.09	0	0	0.12

Precisión global = 81.67%; Kappa=0.83.

Tabla 4. Matriz de transición por clase para el periodo 1995-2010.

Año	Urbano*	Agrícola*	Bosque*	Matorral de montaña*	Suelo desnudo*	Agua*	Superficie total*
1995	2651.23	279.07	6776.63	17280.57	1186.59	11.21	28185.3
2000	3236.5	433.96	7780.81	15979.00	746.79	8.24	28185.3
2005	5060.69	276.44	5603.65	14506.45	2732.74	5.32	28185.3
2010	7540.38	190.70	3111.33	15485.12	1855.60	2.16	28185.3

*Las coberturas están expresadas en ha.

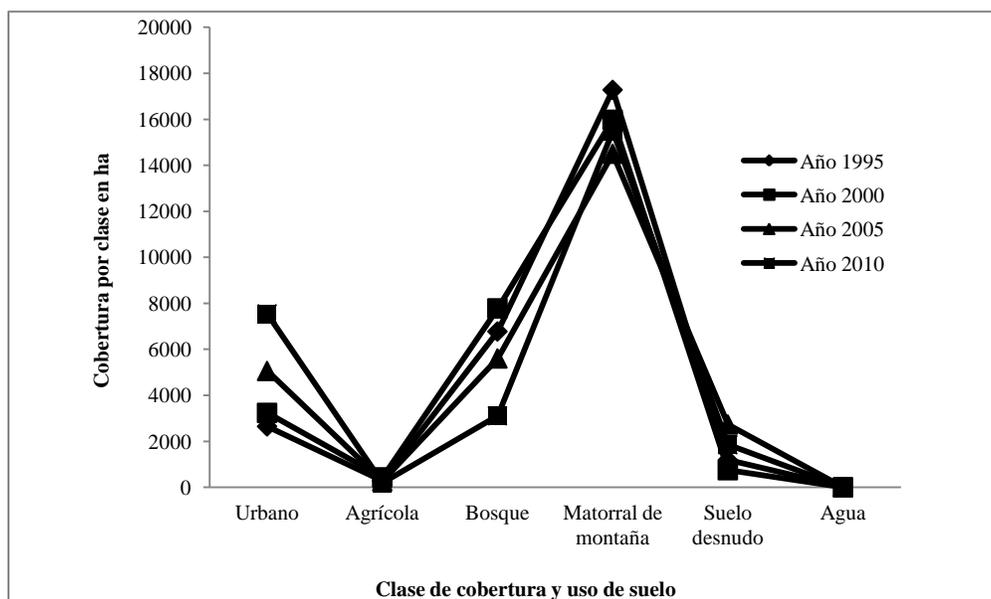


Figura 7. Gráfico que identifica los cambios abruptos en los diferentes usos y coberturas de suelo para el periodo 1995-2010. Software utilizado: ArcGis 9.3.

Además, fue posible obtener las matrices de transición que explican claramente los cambios ocurridos (Tablas 5, 6 y 7), para periodos de 5 años (1995-2000, 2000-2005 y 2005-2010), esta metodología es utilizada por diversos autores (Weng, 2002; Flamenco *et al.*, 2007; Reis, 2008; Rahdary *et al.*, 2008). También se generaron las matrices de probabilidad de cambio (Tabla 8, 9 y 10), en las cuales se puede observar las clases que

tienen mayor probabilidad de permanencia en el tiempo.

Discusión

En este estudio se identifican los procesos de cambio antropogénico vinculados con la modificación de coberturas del suelo en la conurbación binacional Nogales Sonora-Nogales

Tabla 5. Matriz de detección de cambio de cobertura y uso de suelo para Nogales, Sonora-Arizona en ha, durante el periodo 1995-2000.

	Urbano	Agrícola	Bosque	Matorral de montaña	Suelo desnudo	Agua	Cobertura total año 1 (1995)
Urbano	2651.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2651.23
Agrícola	2.07	265.57	0.54	6.03	4.86	0.00	279.07
Bosque	24.75	104.13	3623.67	2916.62	107.46	0.00	6776.63
Matorral de montaña	348.30	36.45	4076.25	12492.32	327.24	0.00	17280.56
Suelo desnudo	206.73	27.81	80.26	563.94	307.23	0.63	1186.59
Agua	3.42	0.00	0.09	0.09	0.00	7.61	11.21
Cobertura total año 2 (2000)	3236.50	433.96	7780.81	15979.00	746.79	8.24	28185.29

Tabla 6. Matriz de detección de cambio de cobertura y uso de suelo para Nogales, Sonora-Arizona en ha, durante el periodo 2000-2005.

	Urbano	Agrícola	Bosque	Matorral de montaña	Suelo desnudo	Agua	Cobertura total año 1 (2000)
Urbano	3236.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3236.50
Agrícola	2.72	237.00	128.72	50.65	14.87	0.00	433.96
Bosque	1204.39	9.18	2648.31	2654.56	1264.28	0.09	7780.81
Matorral de montaña	395.16	24.59	2766.09	11597.18	1194.54	1.44	15979.00
Suelo desnudo	217.57	5.67	60.53	204.06	258.96	0.00	746.79
Agua	4.35	0.00	0.00	0.00	0.09	3.80	8.24
Cobertura total año 2 (2005)	5060.69	276.44	5603.65	14506.45	2732.74	5.33	28185.29

Tabla 7. Matriz de detección de cambio de cobertura y uso de suelo para Nogales, Sonora-Arizona en ha, durante el periodo 2005-2010

	Urbano	Agrícola	Bosque	Matorral de montaña	Suelo desnudo	Agua	Cobertura total año 1 (2005)
Urbano	5060.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5060.69
Agrícola	1.35	170.10	51.84	22.73	30.42	0.00	276.44
Bosque	1938.19	11.81	1627.77	1839.17	186.71	0.00	5603.65
Matorral de montaña	197.01	5.41	1364.26	12392.24	547.53	0.00	14506.45
Suelo desnudo	342.59	3.38	66.71	1230.98	1089.08	0.00	2732.74
Agua	0.55	0.00	0.75	0.00	1.86	2.16	5.32
Cobertura total año 2 (2010)	7540.38	190.70	3111.33	15485.12	1855.60	2.16	28185.29

Tabla 8. Matriz de probabilidad de cambio de cobertura y uso de suelo para Nogales, Sonora-Arizona durante el periodo 1995–2000.

	Urbano	Agrícola	Bosque	Matorral de montaña	Suelo desnudo	Agua	Sumatoria
Urbano	1	0	0	0	0	0	1
Agrícola	0.01	0.95	0	0.02	0.02	0	1
Bosque	0	0.02	0.53	0.43	0.02	0	1
Matorral de montaña	0.02	0	0.24	0.72	0.02	0	1
Suelo desnudo	0.17	0.02	0.07	0.48	0.26	0	1
Agua	0.31	0	0.01	0.01	0	0.68	1

Tabla 9. Matriz de probabilidad de cambio de cobertura y uso de suelo para Nogales, Sonora-Arizona durante el periodo 2000–2005.

	Urbano	Agrícola	Bosque	Matorral de montaña	Suelo desnudo	Agua	Sumatoria
Urbano	1	0	0	0	0	0	1
Agrícola	0.01	0.55	0.30	0.12	0.03	0	1
Bosque	0.15	0	0.34	0.34	0.16	0	1
Matorral de montaña	0.02	0	0.17	0.73	0.07	0	1
Suelo desnudo	0.29	0.01	0.08	0.27	0.35	0	1
Agua	0.53	0	0	0	0.01	0.46	1

Tabla 10. Matriz de probabilidad de cambio de cobertura y uso de suelo para Nogales, Sonora-Arizona durante el periodo 2005–2010.

	Urbano	Agrícola	Bosque	Matorral de montaña	Suelo desnudo	Agua	Sumatoria
Urbano	1	0	0	0	0	0	1
Agrícola	0	0.62	0.19	0.08	0.11	0	1
Bosque	0.35	0	0.29	0.33	0.03	0	1
Matorral de montaña	0.01	0	0.09	0.85	0.04	0	1
Suelo desnudo	0.13	0	0.02	0.45	0.40	0	1
Agua	0.10	0	0.14	0.00	0.35	0.41	1

Arizona. Otros autores ya han abordado el tema de cambio de uso del suelo en México (Bocco *et al.*, 2001; Berlanga y Ruiz, 2007). Este no es un tema novedoso en el ámbito académico, pero el valor de nuestros resultados radica en que son muy escasos los estudios que abordan la clasificación y comparación en ambientes transfronterizos (Sánchez *et al.*, 2012). Las comparaciones binacionales permiten poner en perspectiva el papel que desempeñan regímenes sociopolíticos y culturas distintas en los procesos de cambio del paisaje. Esta información es de utilidad para la planeación binacional, y en particular para países como el nuestro que comparte una frontera común con los Estados Unidos de más de 3000 km de extensión. Sean de territorios interiores o transfronterizos, los trabajos que abordan el estudio de los cambios de uso del suelo, buscan elucidar el impacto de las actividades humanas sobre la cubierta vegetal, y las tendencias y la dinámica espacio-temporal de distintos usos y coberturas de suelo. Los hallazgos al respecto, permiten definir acciones para la

sustentabilidad del territorio, pues identifican los procesos principales de deterioro ambiental y los factores causales que los originan.

En el trabajo que aquí se presenta, se retoman dichas temáticas, pero se aborda la problemática de cambios en el paisaje incorporando el análisis de este, en contextos geográficos diferentes, Nogales Sonora y Nogales Arizona forman parte de una misma conurbación, se ubican en un medio físico similar, pero pertenecen en última instancia, a dos países con cultura distinta, con regímenes políticos desiguales, y con niveles de desarrollo económico muy contrastantes. Entre otras cosas por estas razones, presentan patrones de ocupación del espacio muy disímiles entre sí, aun cuando hay un nivel muy elevado de intercambio económico entre ellas.

De manera general, los resultados indican que la clase con mayor probabilidad de permanencia en el primer periodo evaluados lo urbano (Tablas 8, 9 y 10), seguido de los agrícola y el matorral de montaña. En el segundo periodo evaluado, se

observa de nueva cuenta la permanencia de lo urbano e inclusive crece aún más y esta vez la clase agrícola pierde probabilidad de seguir en el tiempo, mientras que la probabilidad del matorral de montaña aumenta (Tabla 8, 9 y 10).

Cabe destacar, que el uso de suelo urbano aumentó una gran cantidad de hectáreas, es decir en el periodo 1995–2010 inicialmente presentaba 2651.23 ha y para el último periodo ya cuenta con 7540.38 ha, es decir se incrementó en 4889.15 ha o bien un 284.41% sobre los distintos usos y/o coberturas de suelo manejados.

Es importante destacar que la clase bosque está perdiendo terreno, pero no a causa del uso urbano, sino que su lugar está siendo ocupado por la cobertura matorral de montaña, un tipo de vegetación secundaria resultante de la acción antrópica que se establecen en lugares con gran perturbación. El problema de este tipo de

vegetación sobre todo en regiones desérticas, es que son sumamente frágiles y presentan un ritmo ecológico lento, por lo que cualquier alteración humana tarde tiempo en ser borrada, volviéndolo vulnerable a procesos de erosión, pérdida de la biodiversidad, a un cambio en la composición de plantas e incrementa el riesgo a incendios (Luege, 2005).

De manera particular, el crecimiento urbano en área de Nogales Arizona, resulta ser del 438% durante el periodo 1995–2010, creciendo principalmente sobre la cobertura vegetal, específicamente el bosque (Ver Tablas 11, 12 y 13), lo cual probablemente se deba a una estrategia de urbanización en forma de suburbios o fraccionamientos localizados fuera de la ciudad, principalmente por el poder adquisitivo de los grupos sociales medio a alto, influyendo aquí, la disponibilidad de vehículos.

Tabla 11. Matriz de detección de cambio de cobertura y uso de suelo para Nogales, Arizona en ha, durante el periodo 1995–2000.

	Urbano	Agrícola	Bosque	Matorral de montaña	Suelo desnudo	Agua	Cobertura total año 1 (1995)
Urbano	927.07	0	0	0	0	0	927.07
Agrícola	2.07	265.21	0.54	6.03	4.86	0	278.71
Bosque	23.13	97.83	2672.43	1981.23	33.03	0	4807.65
Matorral de montaña	201.15	35.82	3460.06	6499.38	111.69	0	10308.10
Suelo desnudo	84.33	27.81	71.26	402.78	141.55	0.63	728.34
Agua	3.24	0	0.09	0	0	5.78	9.11
Cobertura total año 2 (2000)	1240.99	426.67	6204.37	8889.41	291.12	6.41	17058.98

Tabla 12. Matriz de detección de cambio de cobertura y uso de suelo para Nogales, Arizona en ha, durante el periodo 2000–2005.

	Urbano	Agrícola	Bosque	Matorral de montaña	Suelo desnudo	Agua	Cobertura total año 1 (2000)
Urbano	1240.99	0	0	0	0	0	1240.99
Agrícola	2.72	233.71	128.72	48.15	13.37	0	426.67
Bosque	625.59	9.18	2394.04	2348.48	827	0.09	6204.38
Matorral de montaña	128.43	24.23	1920.09	6523.48	293.01	0.18	8889.42
Suelo desnudo	98.87	5.67	56.75	57.54	72.3	0	291.13
Agua	2.52	0	0	0	0.09	3.8	6.41
Cobertura total año 2 (2005)	2099.11	272.79	4499.6	8977.65	1205.77	4.07	17058.99

Tabla 13. Matriz de detección de cambio de cobertura y uso de suelo para Nogales, Arizona en ha, durante el periodo 2005–2010.

	Urbano	Agrícola	Bosque	Matorral de montaña	Suelo desnudo	Agua	Cobertura total año 1 (2005)
Urbano	2099.12	0	0	0	0	0	2099.12
Agrícola	1.35	170.1	51.84	19.08	30.42	0	272.79
Bosque	1732.52	10.89	1500.8	1134.34	121.05	0	4499.6
Matorral de montaña	148.5	4.41	631.35	7698.78	494.61	0	8977.65
Suelo desnudo	84.69	3.2	44.48	974.44	98.96	0	1205.77
Agua	0.55	0	0.75	0	0.6	2.16	4.06
Cobertura total año 2 (2010)	4066.73	188.6	2229.22	9826.64	745.64	2.16	17058.99

En el caso de Nogales México, aunque la clase bosque es muy poca, el crecimiento urbano se da a costa de esta cobertura, así como el matorral de montaña y el suelo desnudo (Ver Tablas 14,15 y16). El fenómeno de crecimiento en esta zona es diferente, pues mientras que en el otro lado de la frontera se crean puntos de focalizados de crecimiento, en Nogales México, existe un patrón

agregado, es decir la ciudad se expande a partir de los límites de la misma, quizás se deba, a las pocas posibilidades que tienen los habitantes para obtener un vehículo o si por ejemplo, el transporte público es capaz de transportarlo cierta distancia y es el único lugar disponible, será allí donde establezca su hogar.

Cabe destacar que la cobertura de bosque está

Tabla 14. Matriz de detección de cambio de cobertura y uso de suelo para Nogales, Sonora en ha, durante el periodo 1995–2000.

	Urbano	Agrícola	Bosque	Matorral de montaña	Suelo desnudo	Agua	Cobertura total año 1 (1995)
Urbano	1724.16	0	0	0	0	0	1724.16
Agrícola	0	0.36	0	0	0	0	0.36
Bosque	1.62	6.3	951.24	935.39	74.43	0	1968.98
Matorral de montaña	147.15	0.63	616.19	5992.94	215.55	0	6972.46
Suelo desnudo	122.4	0	9	161.16	165.68	0	458.24
Agua	0.18	0	0	0.09	0	1.83	2.1
Cobertura total año 2 (2000)	1995.51	7.29	1576.43	7089.58	455.66	1.83	11126.3

Tabla 15. Matriz de detección de cambio de cobertura y uso de suelo para Nogales, Sonora en ha, durante el periodo 2000–2005.

	Urbano	Agrícola	Bosque	Matorral de montaña	Suelo desnudo	Agua	Cobertura total año 1 (2000)
Urbano	1995.51	0	0	0	0	0	1995.51
Agrícola	0	3.29	0	2.5	1.5	0	7.29
Bosque	578.8	0	254.27	306.08	437.28	0	1576.43
Matorral de montaña	266.73	0.36	846	5073.7	901.53	1.26	7089.58
Suelo desnudo	118.7	0	3.78	146.52	186.66	0	455.66
Agua	1.83	0	0	0	0	0	1.83
Cobertura total año 2 (2005)	2961.57	3.65	1104.05	5528.8	1526.97	1.26	11126.3

Tabla 16. Matriz de detección de cambio de cobertura y uso de suelo para Nogales, Sonora en ha, durante el periodo 2005–2010.

	Urbano	Agrícola	Bosque	Matorral de montaña	Suelo desnudo	Agua	Cobertura total año 1 (2005)
Urbano	2961.57	0	0	0	0	0	2961.57
Agrícola	0	0	0	3.65	0	0	3.65
Bosque	205.67	0.92	126.97	704.83	65.66	0	1104.05
Matorral de montaña	48.51	1	732.91	4693.46	52.92	0	5528.8
Suelo desnudo	257.9	0.18	22.23	256.54	990.12	0	1526.97
Agua	0	0	0		1.26	0	1.26
Cobertura total año 2 (2010)	3473.65	2.1	882.11	5658.48	1109.96	0	11126.3

siendo degradada con mayor velocidad en el área de Nogales Arizona, principalmente por que originalmente esta zona contaba con mayor superficie que pertenecía a esta clase.

Conclusiones

Es evidente que el uso de técnicas de percepción remota, pueden tener aplicaciones que permitan comprender diversos fenómenos que ocurren en el espacio geográfico, como lo es, en el caso de este trabajo, en el cual se evaluaron patrones de crecimiento para distintas clases de uso y/o cobertura de suelo. Ante esta situación, fue necesario generar una clasificación por el procedimiento de máxima verosimilitud, se observa que a partir de ellos es posible generar mapas temáticos precisos, que dependerán en gran parte del cuidado que el usuario ponga a la hora de generar la información.

La evaluación de la fiabilidad mediante un índice Kappa es importante en este tipo de estudios, ya que permite aceptar o rechazar una cartografía de usos de suelo con la que probablemente se puedan generar subproductos como lo fue en el caso de las matrices de transición, las cuales permiten descubrir y monitorear constantemente patrones de cambio, que pueden ser de gran ayuda en cuestiones ambientales, sociales, económicos u otros.

Es posible observar como el matorral de montaña va ganando terreno sobre otras coberturas de suelo, como el bosque y el suelo desnudo, este resultado requiere especial atención, ya que este tipo de vegetación suele ser una especie que se presenta en áreas de sucesión ecológica provocadas principalmente, por acciones del hombre.

De manera particular se observan diferencias en cada uno de los países, ante esta situación, enumerar pormenorizadamente los contrastes México-EU es

difícil, debido a cuestiones de espacio, pero se pueden mencionar dos ejemplos que son muy notorios. El primero de ellos es la evolución de uso del suelo urbano, el segundo es la evolución de la clase bosque.

Estas diferencias pueden y deben ser objeto de evaluaciones futuras con herramientas como ecología del paisaje, predicción con modelos de cambio, etc., pues así se llegará a establecer con más claridad los impactos humanos y las tendencias de deterioro ambiental provocado por la conversión de usos del suelo.

Bibliografía

- Berlanga Robles, C. A., García Campos, R. R., López Blanco, J., & Ruiz Luna, A. 2010. Patrones de cambio de coberturas y usos del suelo en la región costa norte de Nayarit (1973-2000). *Investigaciones Geográficas*, 72:7 - 22.
- Berlanga Robles, C. A., & Ruiz Luna, A. (2007). Análisis de las tendencias del cambio del bosque de mangel del sistema lagunar Tecapán-Agua Brava, México. Una aproximación con el uso de imágenes del satélite Landsat. *Red De Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal*, 23 (1):29-46.
- Berlanga Robles, C. A., & Ruiz Luna, A. (2002). Land Use Mapping and Change Detection in the Coastal Zone of Northwest Mexico Using Remote Sensing Techniques. *Coastal Research*, 18:514-522.
- Bocco, G., Mendoza, M., & Masera, O. R. 2001. La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas*, (044):18-38.
- Camou, E. (1998). De rancheros, poquiteros, orejanos y criollos. *REGIÓN Y SOCIEDAD*.
- Camou, E. (1994). Los Sistemas de Producción Bovina en Sonora: Criadores de Becerras, Cambio Tecnológico y Mercado Internacional. Tesis Doctoral en Ciencias Sociales. Zamora, Michoacán.
- Chuvieco Salinero, E. 2008. Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio. España: Editorial Ariel, Madrid, 594 pp.
- Congalton, R. G. 1991. A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. *Remote Sensing of Environment*, 37:35-46.
- Flamenco Sandoval, A., Martínez Ramos, M., & Masera, O. R.

2007. Assessing implications of land-use and land-cover change dynamics for conservation of a highly diverse tropical rain forest. *ELSEVIER*, 138:131 - 145.
- François Mas, J., Díaz Gallegos, J. R., & Pérez Vega, A. (2003). Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. *Investigaciones Geográficas*, (51):53-72.
- García Mora, T. J., & François Mas, J. 2008. Comparación de metodologías para el mapeo de la cobertura y uso del suelo en el sureste de México. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*,(67):7-19.
- García, E. (1998). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Recuperado el 3 de Agosto de 2012, de Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO): (en <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>)
- Liu, C., Frazier, P., & Kumar, L. 2007. Comparative assessment of the measures of thematic classification accuracy. *Remote Sensing of Environment*, 107(4):606 - 616.
- Luege Tamargo, J. L. (Diciembre de 2005). *Vegetación y uso del suelo*. Recuperado el 20 de Septiembre de 2012, de http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/02_vegetacion/cap2_3.html
- Mendoza, M. E., Bocco, G., López, E., & Bravo, M. 2002. Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso de suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca del lago de Cuitzeo, Michoacán. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía de la UNAM*, (049):125-152.
- Priego, Á., Cotler, H., Friegoso, A., Luna, N., & Enriquez Guaderrama, C. 2004. La dinámica ambiental de la cuenca Lerma-Chapala. *La dinámica ambiental*, (071):23-35.
- Rahdary, V., Soffianian, A., Maleki Najfabdai, S., Khajeddin, S. J., & Pahlavanravi. 2008. Land Use and Land Cover Change Detection of Mouteh Wildlife Refuge Using Remotely Sensed Data and Geographic Information System. *World Applied Sciences Journal*, 3:113 - 118.
- Reis, S. 2008. Analyzing Land Use/Land Cover Changes Using Remote Sensing and GIS in Rize, North-East Turkey. *Sensors*, 8(10):6188 - 6202.
- Richards, J. A. 1996. Classifier Performance and Map Accuracy. *Remote sensing of environment*, 57(3):161 - 166.
- Sánchez Flores, E., Díaz Caravantes, R. E., Bravo Peña, L. C., & Zúñiga Patricio, B. L. 2012. Sistema de monitoreo de la dinámica de uso de suelo (MoDUS) EN LA REGIÓN binacional México-Estados Unidos. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 12:1-15.
- Velázquez, A., Mas, J., Díaz-Gallegos, J., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, P., Castro, R., Fernández, T., Bocco, G., Ezcurra, E., Palacio, J. 2002. Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Dinámica ambiental*, (62):21-37.
- Vitousek, P. M., Mooney, H. A., Lubchenco, J., & Melillo, J. M. 1997. Human Domination of Earth's Ecosystems. *American Association for the Advancement of Science*, 277(5325):494-499.
- Weng, Q. (2002). Land use change analysis in the Zhujiang Delta of China using satellite remote sensing, GIS and stochastic modelling. *Journal of Environmental Management*, 64:277 - 284.