



Investigaciones Geográficas (Mx)

ISSN: 0188-4611

edito@igg.unam.mx

Instituto de Geografía

México

Díaz Caravantes, Rolando Enrique; Bravo Peña, Luis Carlos; Alatorre Cejudo, Luis Carlos; Sánchez Flores, Erick

Análisis geoespacial de la interacción entre el uso de suelo y de agua en el área peri-urbana de Cuauhtémoc, Chihuahua. Un estudio socioambiental en el norte de México

Investigaciones Geográficas (Mx), núm. 83, 2014, pp. 116-130

Instituto de Geografía

Distrito Federal, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56930750009>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

## **Análisis geoespacial de la interacción entre el uso de suelo y de agua en el área peri-urbana de Cuauhtémoc, Chihuahua. Un estudio socioambiental en el norte de México**

Recibido: 14 de octubre de 2012. Aceptado en versión final: 8 de mayo de 2013.

Rolando Enrique Díaz Caravantes\*

Luis Carlos Bravo Peña\*\*

Luis Carlos Alatorre Cejudo\*\*

Erick Sánchez Flores\*\*\*

**Resumen.** Por décadas, el crecimiento de las ciudades solamente se ha considerado en función de la disposición de suelo. En las ciudades del norte de México, usualmente ubicadas en regiones áridas o semiáridas, existe una alta dependencia del agua subterránea. Por esta razón, la planeación integral urbana está obligada no solo a considerar el área peri-urbana en función del suelo, sino también del agua subterránea. La transferencia de agua para uso urbano produce severas alteraciones al medio natural como el agotamiento de acuíferos y cambios drásticos en el uso del suelo y la cubierta vegetal. En este documento se presenta un análisis geoespacial del uso del suelo y agua en el área

peri-urbana de Ciudad Cuauhtémoc. Mediante modelación geográfica y percepción remota se evalúa la dinámica del uso y cobertura de suelo. Los resultados indican que los procesos de cambio de uso del suelo y cubierta vegetal ocurren en un contexto de alta competencia por el agua entre diversos usuarios. Este proceso usualmente no se considera en los estudios que miden la expansión espacial urbana, pero debe considerarse para comprender integralmente los efectos del crecimiento urbano en el territorio.

**Palabras clave:** Agua, suelo, peri-urbano, socioambiental, presión.

---

\* El Colegio de Sonora, Calle Obregón #54, Col. Centro, 83000, Hermosillo, Sonora, México. E-mail: rdiaz@colson.edu.mx

\*\* Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, División Cuauhtémoc, Calle Morelos y Privada del Roble 101, 31579, Cuauhtémoc, Chihuahua, México. E-mail: luis.bravo@uacj.mx; luis.alatorre@uacj.mx

\*\*\* Instituto de Arquitectura Diseño y Arte, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Av. del Charro 450 N, 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México. E-mail: esanchez@uacj.mx

### Cómo citar:

Díaz Caravantes, R., L. C. Bravo Peña, L. C. Alatorre Cejudo y E. Sánchez Flores (2014), "Análisis geoespacial de la interacción entre el uso de suelo y de agua en el área peri-urbana de Cuauhtémoc, Chihuahua. Un estudio socioambiental en el norte de México", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 83, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 117-131, doi: 10.14350/rig.32694.

# Geospatial analysis of land use and water interaction in the peri-urban area of Cuauhtémoc, Chihuahua.

## A socio-environmental study in northern Mexico

**Abstract.** For decades, city growth has been considered only in terms of land availability. In cities of northern Mexico, usually located in arid or semi-arid regions, there is a high dependence on groundwater. For this reason, comprehensive planning urban must consider the peri-urban area not only in terms of soil, but also groundwater. Water transfer for urban use produces severe alterations to the natural environment as aquifer depletion and drastic changes in land use/cover. This paper presents a spatial analysis of land use and water in the peri-urban area of Ciudad Cuauhtémoc.

Using geographic modeling and remote sensing we assessed the dynamics of land use/cover. The results indicate that land change processes occur in a context of high competition for water between different users. This process is not usually considered in studies measuring urban spatial expansion, but should be considered to fully understand the effects of urban growth in the territory.

**Key words:** Water, soil, peri-urban, socio-environmental, pressure.

### INTRODUCCIÓN

A partir de 2008 más del 50% de la población mundial habita en ciudades (World Watch Institute, 2007). Este hecho convierte a la humanidad en una sociedad predominantemente urbana, cuya proporción se prevé que alcance el 69.6% para el 2050, de acuerdo con las Naciones Unidas (United Nations, 2009). Los retos que plantea este incremento de la población urbana tienen diferentes dimensiones que se derivan, fundamentalmente, del aumento de la necesidad de recursos para la satisfacción de necesidades básicas.

En México, la población en las ciudades con más de 50 000 habitantes se ha proyectado de 55 millones en el 2005 a 68 millones en el 2030, lo cual equivale a un incremento del 25% (CONAPO, 2009). Con este incremento la población urbana en México alcanzará el 83.3% de la población total en dos décadas (United Nations, 2009). Aunque este crecimiento en sí mismo es significativo, el impacto principal de la población urbana radica en la expansión territorial de las ciudades. Mientras que la tasa de crecimiento anual de la población urbana en México en los últimos 30 años fue de 2.7% anual y se espera que disminuya a 0.68% para 2030; la tasa de expansión territorial de las ciudades en el mismo periodo fue de 7.4% anual (ONU-HABITAT, 2011). De acuerdo con el Departamento de Desarrollo Urbano del Banco Mundial, en las ciudades de países en desarrollo el área urbanizada

se incrementará de 200 000 a 600 000 km<sup>2</sup> del 2000 al 2030 (Angel *et al.*, 2005).

El crecimiento en la población urbana y la expansión física de las ciudades tienen impactos significativos en el ambiente a escalas local y global (Herold *et al.*, 2003). Por un lado, el incremento en la demanda de suelo para satisfacer las necesidades de vivienda y empleo urbanos produce cambios en el uso de suelo que impactan la configuración y movilidad interna en las ciudades; mientras que por otro, estos mismos cambios afectan la disponibilidad de recursos esenciales para el funcionamiento de las ciudades y de las áreas productivas que las rodean.

Además del suelo, la disponibilidad de agua es también un factor determinante para el crecimiento y desarrollo económico en áreas urbanas de regiones en desarrollo. En las últimas décadas se ha reconocido que existe una crisis global en disponibilidad y calidad del agua (Bogardi *et al.*, 2012). En términos generales, el crecimiento poblacional y económico han sido los factores más importantes que han propiciado la escasez del agua (Rosegrant *et al.*, 2002). Se estima que a nivel global el 20% de la población no tiene acceso a agua potable y que el 50% no tiene acceso a un adecuado saneamiento (Cosgrove y Rijsberman, 2000). Especialmente en ciudades del norte árido de México, la demanda de agua para uso urbano se ha convertido en un factor crítico (Cortez *et al.*, 2005; Aguilar y Mathis, 2005).

La demanda social de agua para uso urbano se ha convertido en un factor crítico que limita el desarrollo (Cortez *et al.*, 2005; Aguilar y Mathis 2005). Expertos en el tema urbano reconocen que el problema es la concepción de las ciudades como una entidad desconectada del medio ambiente que las rodea y las sustenta (Vasishth y Sloane, 2002). El área que rodea a las ciudades, el área peri-urbana, ha sido reiteradamente desatendida en las políticas y planes urbanos y solamente se toma en cuenta en función de los requerimientos de la ciudad, como reserva de suelo, depósito de basura, suministro de agua, entre otros (Mcgregor *et al.*, 2006).

La importancia de los cambios de uso y cobertura de suelo ha motivado el surgimiento de nuevas sub-disciplinas enfocadas completamente en el análisis de las alteraciones del suelo debido a cambios naturales o antropogénicos (Rindfuss *et al.*, 2004). En las últimas décadas, los sistemas de percepción remota permiten el monitoreo preciso y oportuno de los cambios de cobertura de suelo facilitando la evaluación espacio-temporal de procesos ecológicos globales y locales (Sánchez y Yool, 2007). Los sistemas de percepción remota brindan indicadores claves para el manejo ambiental y la planeación de áreas urbanas tales como superficie impermeable y área construida (Yuan, 2008).

Si bien los cambios de uso de suelo producidos por el crecimiento de las ciudades en el área peri-urbana han sido extensamente analizados por medio de los sistemas de percepción remota, el patrón geoespacial de la extracción de agua urbana y sus efectos en la configuración territorial han tenido un estudio muy limitado. No obstante, como ya se ha demostrado en otros estudios, la transferencia de agua hacia las ciudades puede tener efectos considerables en el uso y cobertura del suelo que rodea los sitios de extracción de agua pues regularmente se le otorga prioridad al uso urbano, se transfiere el agua agrícola a la ciudad y se abandonan las tierras de uso agrícola o se deterioran las áreas con coberturas de vegetación natural (Díaz y Sánchez, 2011).

Pocas veces se aborda la interacción entre los usos del suelo y los usos del agua; sin embargo, este tema es crítico para la sustentabilidad urbana porque la transferencia de agua para uso urbano produce severas alteraciones al medio natural tales

como el agotamiento de acuíferos y una disminución en las coberturas vegetales. Dada la importancia de esta problemática, el objetivo general de este trabajo consiste en evaluar la dinámica del uso del suelo y del agua en el área peri-urbana de Ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua en las últimas dos décadas. Los objetivos específicos son: *a)* definir el área peri-urbana, *b)* analizar los cambios de uso y cobertura de suelo más significativos en el área peri-urbana de Ciudad Cuauhtémoc, y *c)* identificar las zonas de mayor presión por extracción de agua subterránea en el área peri-urbana.

Como se demuestra en este trabajo, el cambio de uso y cobertura de suelo en las áreas peri-urbanas del norte de México está ligado a las tensiones que surgen entre usuarios urbanos y agrícolas por el uso del agua subterránea. Los efectos que provoca la competencia por el agua en las áreas peri-urbanas para satisfacer la demanda de usos del suelo generan un cambio en la cobertura vegetal que es importante analizar. Se ha observado la ocurrencia de cambios importantes en el uso de suelo agrícola debido a la transferencia de agua para uso agrícola en áreas peri-urbanas al uso urbano en las ciudades en crecimiento (*Ibid.*), pero como se demuestra en este documento, este patrón puede ser distinto en otros contextos geográficos.

El término peri-urbano tiene diferente interpretación según el contexto en el que es aplicado (Mcgregor *et al.*, 2006). Para esta investigación, se entiende lo peri-urbano como un área de transición entre lo urbano y lo rural en la que ocurren procesos de transferencia de materia y energía que retroalimentan e impactan a cada uno de los subsistemas y los vinculan funcionalmente a diversas escalas. En este caso la materia de análisis es el recurso agua, la relación funcional es su transferencia desde el área peri-urbana a la ciudad y su impacto, el que ocurre en la dinámica de la cobertura vegetal del área peri-urbana.

## ÁREA EN ESTUDIO

Ciudad Cuauhtémoc es la cuarta más poblada del estado de Chihuahua. Se localiza en la zona central de esta entidad federativa (coordenadas: 28° 24' 16"

Norte; 106° 51'54" Oeste), a 103 km al suroeste de Chihuahua, la capital estatal (Figura 1). Está considerada como la puerta de entrada a la región de la Sierra Tarahumara.

La superficie urbanizada de Ciudad Cuauhtémoc es de alrededor de 27 km<sup>2</sup> y en el censo de 2010 su población total fue de 114 007 habitantes, de los cuales 48.7 son hombres y 51.3 mujeres (*Ibid.*). De acuerdo con estos datos, la densidad de población es de 4 222 personas por km<sup>2</sup>.

El municipio de Cuauhtémoc, al cual pertenece la ciudad del mismo nombre, destaca por su dinámica e importante producción agroindustrial, particularmente en la producción de manzana. Debido a esta dinámica económica, Ciudad Cuauhtémoc se ha caracterizado por tener un rápido crecimiento de población. En 1950 eran 6 408 habitantes mientras que en el 2010 ya se censaban 114 007. Un dato que denota la explosión demográfica es que de 1980 al 2010 la población creció en un 162%.

Los recursos hídricos del municipio básicamente son subterráneos y según la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) se encuentran sobre-explotados. De acuerdo con CONAGUA, mientras la recarga total es de 115.2 millones de metros cúbicos (Mm<sup>3</sup>) al año, la extracción anual es de 192 Mm<sup>3</sup> anuales (CONAGUA, 2009:18). En este acuífero sobre-explotado se ubica la única fuente de suministro de agua de Ciudad Cuauhtémoc.

La extracción de agua para uso urbano se realiza a través de 17 pozos profundos, que extraen doce millones de metros cúbicos anuales (hm<sup>3</sup>/año), según la Junta Municipal de Agua (2012). Las extracciones se realizan en medio de problemas serios para la dotación de agua potable, originados por el abatimiento de los mantos acuíferos y la disminución acentuada del nivel estático cuando inicia el riego de los cultivos agrícolas adyacentes a la ciudad. Por estas razones, se ha documentado la inhabilitación y reubicación constante de pozos para uso urbano en los últimos años (SDUC, 2009).

## MÉTODOS Y MATERIALES DE ESTUDIO

El estudio tuvo tres fases: *a)* delimitación del área peri-urbana con base en las zonas de comportamiento semejante del nivel estático y donde existen pozos urbanos; *b)* análisis de percepción remota para identificar los cambios de uso y cobertura de suelo durante el periodo 1993-2010 en el área peri-urbana, y *c)* ubicación de las zonas con mayor presión de extracción de agua dentro el área peri-urbana, con base en los volúmenes concesionados.

### Delimitación de zonas con base en el nivel estático del acuífero

El área peri-urbana comúnmente se conceptualiza como la superficie que rodea la ciudad, que es un

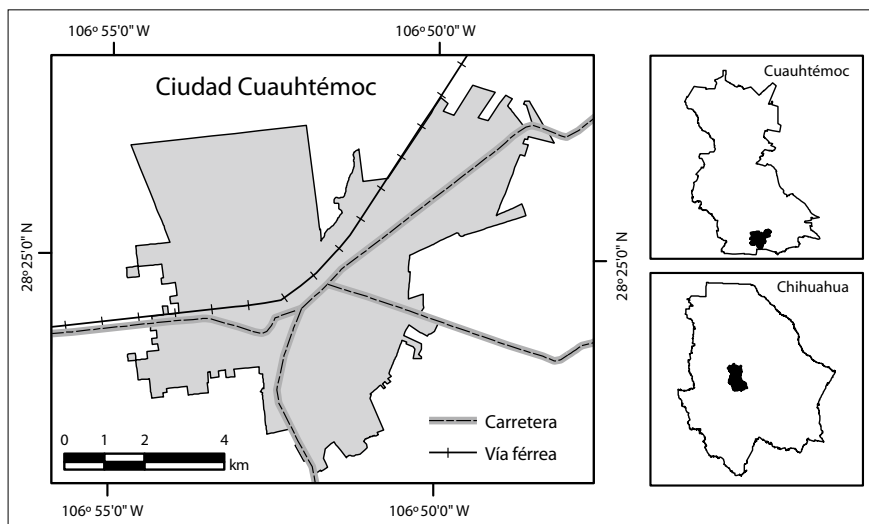


Figura 1. Área urbana en Ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua.

Fuente: INEGI, 2010.

territorio fijo y delimitado en las afueras de una ciudad (Crossman *et al.*, 2007). Sin embargo, según establece Bakker (2003), el agua es un recurso fluido no fácilmente delimitado. La extracción de agua puede producir cambios de uso y cobertura de suelo en su área adyacente y este es un efecto que debe tomarse en cuenta como parte de las consecuencias del crecimiento urbano (Díaz y Sánchez, 2011). Si se considera el área peri-urbana en función de las extracciones de agua que sirven a las ciudades, lo peri-urbano puede abarcar un área geográfica mucho más amplia o simplemente diferente que la zona adyacente a la ciudad debido a las propiedades específicas de agua, que permiten a los flujos ser transportados desde diversas zonas, no necesariamente adyacentes a la ciudad (*Ibid.*). La capacidad de capturar los flujos de agua a las ciudades desde largas distancias a una gran escala hace de lo peri-urbano, en lo que se refiere a los recursos hídricos, un fenómeno que no es limitado solo al área adyacente a las ciudades.

Para hacer la delimitación del área peri-urbana en la cual el agua sea un factor clave, en este trabajo se utilizaron dos fuentes de información. En primer lugar, con base en datos del nivel estático del acuífero de dos periodos: 1973-1991 y 1991-2000, se zonificó el acuífero según el nivel de abatimiento o recarga en estos años. Después se georreferenciaron los 17 pozos urbanos de Ciudad Cuauhtémoc y solo se consideró como área peri-urbana a las zonas del acuífero donde se sobreponían los pozos urbanos.

Para zonificar el acuífero, según el comportamiento del nivel estático, se digitalizaron isolíneas correspondientes del nivel estático del acuífero perteneciente a la cuenca Laguna de Bustillos, obtenidas en los estudios geohidrológicos realizados por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos y la Comisión Nacional del Agua, durante 1973, 1991 y 2000. De las isolíneas digitalizadas, se extrajeron los vértices para evaluar distintos métodos de interpolación incluidos en el módulo Geostatistical Analysis del software ArcGis 9.3.

A partir de los valores que representan los niveles estáticos del acuífero perteneciente a la cuenca Laguna de Bustillos, fue posible comparar diversos métodos de interpolación y establecer el más

óptimo, en función de los errores de predicción, es decir, la media y el error cuadrático medio. En este caso, el resultado más óptimo fue el método Spline regularizado de las funciones de base radial que mostró tener los valores más óptimos, con un error cuadrático de 1.245 y una media del error de -0.017. Una vez determinado el método de interpolación que mejor predice los valores del nivel estático del agua para 1973, se interpolaron los años restantes, 1991 y 2000. Los resultados de cada uno de los años interpolados muestran que los errores de predicción obtenidos son aceptables en orden de magnitud, por lo cual estos modelos de la distribución espacial del nivel estático son aceptables (Tabla 1).

Una vez obtenido el valor del nivel estático del acuífero para cada pixel de la cuadrícula en las tres fechas distintas se utilizó la siguiente fórmula para determinar la tasa de cambio, en metros anuales, de cada periodo.

$$\text{Tasa de cambio anual del periodo} = (\text{Nivel final} - \text{Nivel inicial}) / \text{Número de años del periodo} \quad (1)$$

Algo fundamental que se busca analizar en el comportamiento de un acuífero es cómo ha evolucionado a través del tiempo. Esto se puede lograr analizando la correlación de la tasa de cambio entre dos periodos. Los valores en sí ya están normalizados mediante la tasa de cambio anual para cada periodo y por lo tanto los datos son comparables entre sí. Para este estudio, en el plano cartesiano la tasa de cambio anual del periodo X, en este caso 1991-2000, se grafica en el eje de las abscisas, y la tasa de cambio anual del periodo Y, en este caso 1973-1991, en el eje de las ordenadas.

Tabla 1. Errores en la predicción para los tres años evaluados

Año	Error de la predicción	
	Media	Error Medio Cuadrático
1973	-0.017	1.245
1991	-0.032	0.528
2000	0.001	0.641

Fuente: elaboración propia.

En este caso, cada valor se clasifica según si estuvo por abajo o por arriba del promedio del abatimiento o recarga en el periodo X o si estuvo por abajo o por arriba del promedio de abatimiento o recarga en el periodo Y. Esta clasificación con sus respectivos valores promedios se muestra en la Figura 2.

Como se observa en la Figura 2, son 13 las zonas en las que se pueden clasificar los píxeles de acuerdo con su ubicación con respecto al promedio en los periodos. De éstas, la zona 6 es la que clasifica a los píxeles que están por debajo del promedio en abatimiento o recarga en los dos periodos evaluados.

### Cambios de uso y cobertura de suelo

Como siguiente paso se realizó la comparación multitemporal de coberturas de uso del terreno, correspondientes a 1993 y 2010. El área en estudio queda contenida en dos imágenes adyacentes (Paths 32 y 33, Row 40). Esto hizo necesario armar mosaicos con ambas escenas para cada año. Se seleccionaron en ambas fechas imágenes de la temporada de otoño (octubre-noviembre), con un desfase menor a siete días entre dos escenas adya-

centes. Puesto que las imágenes correspondieron a diferentes fechas, se realizó un re-muestreo a 30 m y corrección geométrica de ambas escenas, a fin de co-registrarlas en el mismo espacio geográfico, y reducir los errores de comparación multitemporal. Una vez que éstas se ajustaron al mismo espacio geográfico, se construyó un mosaico de cada banda espectral. Estos mosaicos se utilizaron como insumos en la clasificación supervisada de usos del suelo.

Se definieron diez clases de cubierta vegetal y de uso del suelo, a partir de recorridos por el área y fotointerpretación. Para cada clase se obtuvo la firma espectral mediante la selección de campos de entrenamiento corroborados *in situ* o mediante fotointerpretación de imágenes de alta resolución (Ortofotos de 1993 o imágenes Ikonos visibles en *Google Earth* correspondientes a los años 2008-10), abarcando en promedio cuatro veces el número mínimo de píxeles requerido por clase (10 m). Posteriormente se analizó la separabilidad de firmas con el Método de la Divergencia Transformada, agregando o descartando los campos existentes si el índice de separabilidad arrojaba valores inferiores

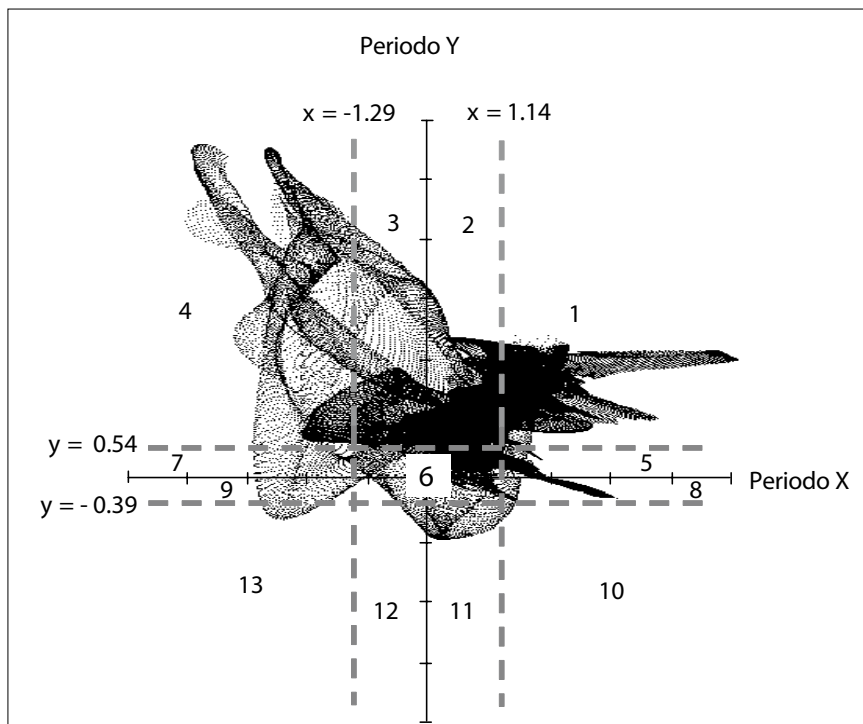


Figura 2. Correlación entre periodos.

Fuente: elaboración propia.

al umbral mínimo de separabilidad aceptada en la bibliografía (García y Mas, 2009).

Una vez aceptadas las firmas espectrales, se realizó la clasificación con el algoritmo de Máxima Verosimilitud (Lillesand y Kiefer, 2003), asignando manualmente las probabilidades de las distintas clases con base en su cobertura aproximada en la realidad, de acuerdo con la experiencia de campo del grupo de trabajo. A las coberturas obtenidas se les aplicó un filtro de moda, para reducir el efecto de “sal y pimienta” y la probabilidad de que píxeles aislados, mal clasificados, sesgaran la evaluación de la confiabilidad post-clasificatoria (Chuvieco, 2008). A estas clases se les agregaron las clases urbano y huertas de manzana, digitalizadas manualmente a partir de imágenes de alta resolución correspondientes a las mismas fechas.

Con las coberturas obtenidas se realizó un ensayo de validación post-clasificatoria, considerando los criterios de confiabilidad estadística mencionados por Congalton y Green (1999), para un análisis de este tipo. Se obtuvieron los valores de Fiabilidad Global, el Índice Kappa, y parámetros de fiabilidad por clase como la exactitud del productor y del usuario (Chuvieco, 2008). Una vez validados, los modelos de ambos años se cortaron con el mapa de zonas de presión de agua subterránea, y se compararon entre sí mediante un análisis de tabulación cruzada (Pontius *et al.*, 2004), con el fin de obtener las matrices de cambio entre 1993 y 2010.

### Zonas de presión sobre el agua subterránea

Los datos para esta fase del estudio fueron los derechos de agua, actualizados a septiembre de 2009 según el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa), que se localizan dentro del área periurbana. Puesto que el registro de cada concesión tiene coordenadas geográficas, cada derecho fue ubicado espacialmente usando ArcMap. Los derechos georreferenciados se utilizaron en la delimitación de las zonas de presión mediante el método de cálculo de densidad de tipo Kernel. Este método convierte puntos (en este caso los derechos de agua) en superficies a partir de sus valores de atributos (Baxter y Beardah, 1997). La transformación permitió crear superficies de densidad del uso del

agua, y geovisualizar estas áreas según un nivel alto, medio o bajo de densidad.

El método de Kernel asigna un valor basado en una muestra del área vecina que rodea al píxel y calcula la “intensidad” de observaciones alrededor del píxel. ArcGIS usa una función cuadrática de tipo Kernel (Silverman, 1986:76), como se muestra a continuación:

$$D(s) = \sum_{i=1}^n S_i (3 / \pi \tau^2) [1 - h_i^2 / \tau^2]^2 \quad (2)$$

En donde  $\tau$  es el radio del círculo de los vecinos,  $h_i$  es la distancia entre el punto X y Y la observación,  $n$  es el número de puntos observados,  $D(s)$  es la densidad en ese punto y  $S_i$  es el punto observado.

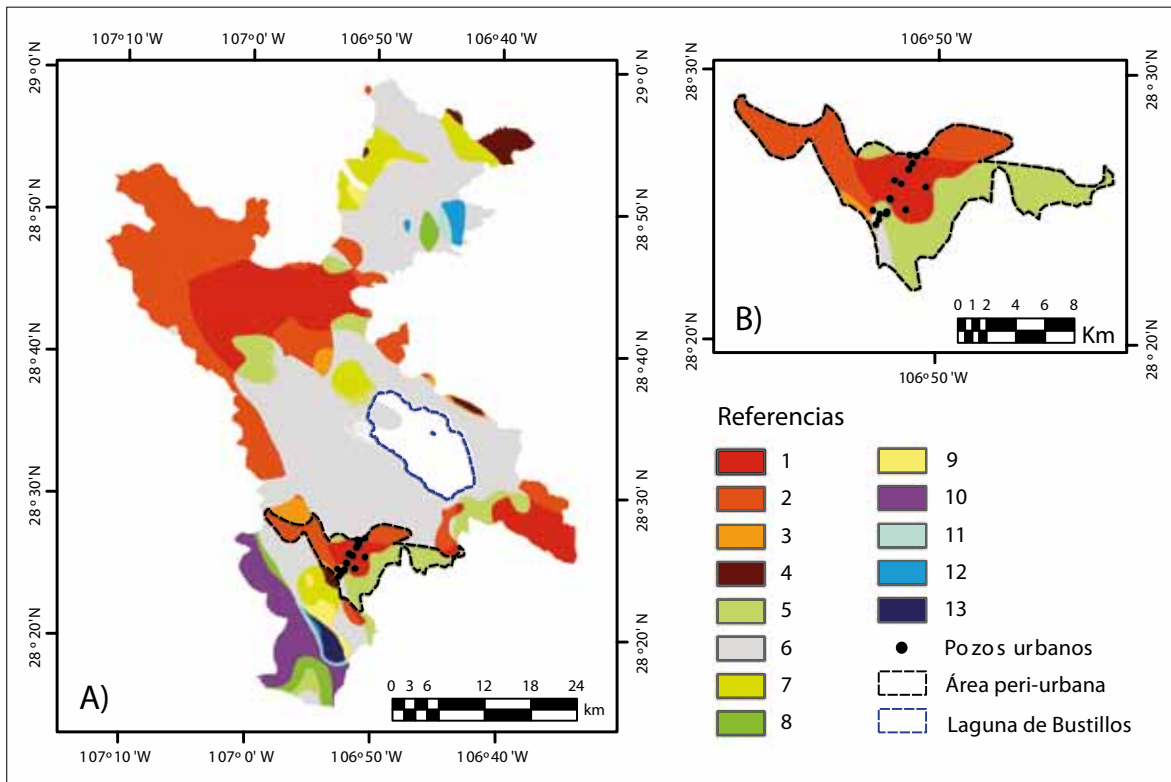
En este estudio se analizó el mapa de densidad con el atributo del volumen de extracción de agua (expresado en metros cúbicos anuales) concesionado por CONAGUA (2010) o referida por la Junta Municipal de Agua (2012). La identificación de las zonas con mayor presión de aprovechamientos subterráneos se realizó con tamaño de píxel de 30 x 30 m (mismo tamaño que el píxel de Landsat). La selección del radio óptimo no se realizó con base en una característica física del territorio en particular, sino de la mejor forma de visualizar el mapa, en relación con la escala utilizada (Díaz y Scott, 2010). En este caso el radio óptimo de visualización fue de 5 km.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Delimitación de zonas con base en el nivel estático del acuífero

Si se distribuyen en el mapa los valores de cada píxel de acuerdo con la clasificación por periodos propuesto en la Figura 2, se obtiene la distribución geográfica que se muestra en la Figura 3A. En esta zonificación se identifican las zonas de igual comportamiento del acuífero, en función de las dinámicas del nivel estático durante el periodo de generación de las isolíneas. Dentro de las zonas de igual comportamiento se puede delimitar el área periurbana: Figura 3B, considerando las franjas de igual dinámica temporal donde se ubica al menos un pozo urbano.





Fuente: elaboración propia con base en CONAGUA, 1991 y 2000; SARH, 1973.

Figura 3. Zonificación con base en el nivel estático del acuífero: A) Evolución del nivel estático, B) Zona peri-urbana por coincidencia espacial de pozos urbanos y áreas de igual presión.

La leyenda de la Figura 3 se describe de la siguiente forma:

1. Abatimiento por arriba del promedio en 91-00 y abatimiento por arriba del promedio en 79-91.
2. Abatimiento por arriba del promedio en 91-00 y abatimiento por abajo del promedio en 79-91.
3. Abatimiento por arriba del promedio en 91-00 y recarga por abajo del promedio en 79-91.
4. Abatimiento por arriba del promedio en 91-00 y recarga por arriba del promedio en 79-91.
5. Abatimiento por abajo del promedio en 91-00 y abatimiento por arriba del promedio en 79-91.
6. Abatimiento o recarga por abajo del promedio en los dos periodos.
7. Abatimiento por abajo del promedio en 91-00 y recarga por arriba del promedio en 79-91.

8. Recarga por abajo del promedio en 91-00 y abatimiento por arriba del promedio en 79-91.
9. Recarga por abajo del promedio en 91-00 y recarga por arriba del promedio en 79-91.
10. Recarga por arriba del promedio en 91-00 y abatimiento por arriba del promedio en 79-91.
11. Recarga por arriba del promedio en 91-00 y abatimiento por abajo del promedio en 79-91.
12. Recarga por arriba del promedio en 91-00 y recarga por abajo del promedio en 79-91.
13. Recarga por arriba del promedio en 91-00 y recarga por arriba del promedio en 79-91.

Como se puede observar en la Figura 3, esta metodología permite distinguir en detalle la evolución del acuífero en diversas zonas. Por ejemplo, la primera clasificación, color rojo, muestra las zonas con abatimiento por arriba del promedio en ambos

periodos, correspondientes a las áreas donde es posible que haya habido una mayor extracción a lo largo de los dos periodos. La segunda clasificación, color naranja, es donde el nivel estático estuvo por arriba del promedio en el segundo periodo y por debajo del promedio entre 1973 y 1991, es decir, son zonas donde posiblemente la extracción se vio incrementada en el periodo más reciente. La clase 6, color gris, muestra las zonas donde el nivel estático del acuífero fue por debajo del promedio en ambos periodos, es decir, la tasa de cambio anual no fue tan considerable en ambos.

Diversos patrones espaciales son visualizados en este mapa; sin embargo, el interés principal en este trabajo es encontrar las zonas que tienen un comportamiento semejante en ambos periodos. Este ejercicio de zonificación, no solo muestra cómo se comportó el nivel estático del acuífero, sino cuáles son las zonas que se comportaron de forma semejante según si estuvieron por debajo o arriba del promedio en el periodo correspondiente. A partir de lo anterior se pudieron definir áreas peri-urbanas (Figura 3B) por la coincidencia espacial de zonas de igual dinámica espacio-temporal y los pozos urbanos.

Esta coincidencia espacial distingue zonas con un comportamiento semejante de los niveles estáticos en dos periodos, y un impacto espacialmente distribuido de los pozos urbanos en estas áreas. A partir de esto, el área peri-urbana resultante constituye una unidad territorial homogénea en términos del comportamiento del acuífero, y en términos de la presión de extracción a la que está sometida. Cabe enfatizar que esta delimitación podría haberse realizado con métodos más simples, pero también más arbitrarios. Este sería el caso si solo se considerara la ubicación espacial de los pozos urbanos, pues se concluiría que el área peri-urbana sería una cierta área de influencia de éstos, a una distancia fija y un tanto arbitraria.

### Cambios de uso y cobertura de suelo

Los modelos de cubierta vegetal y uso del suelo tuvieron valores aceptables en estimadores de exactitud de la clasificación como el Índice Kappa y la Fiabilidad Global (Tabla 2). Los resultados denotan buena correspondencia entre las clases asignadas a

Tabla 2. Valores de confiabilidad global para cada corte histórico analizado

Estimador	Clasificación 1993	Clasificación 2010
Índice Kappa	0.743	0.795
Fiabilidad global	0.810	0.842

Fuente: elaboración propia.

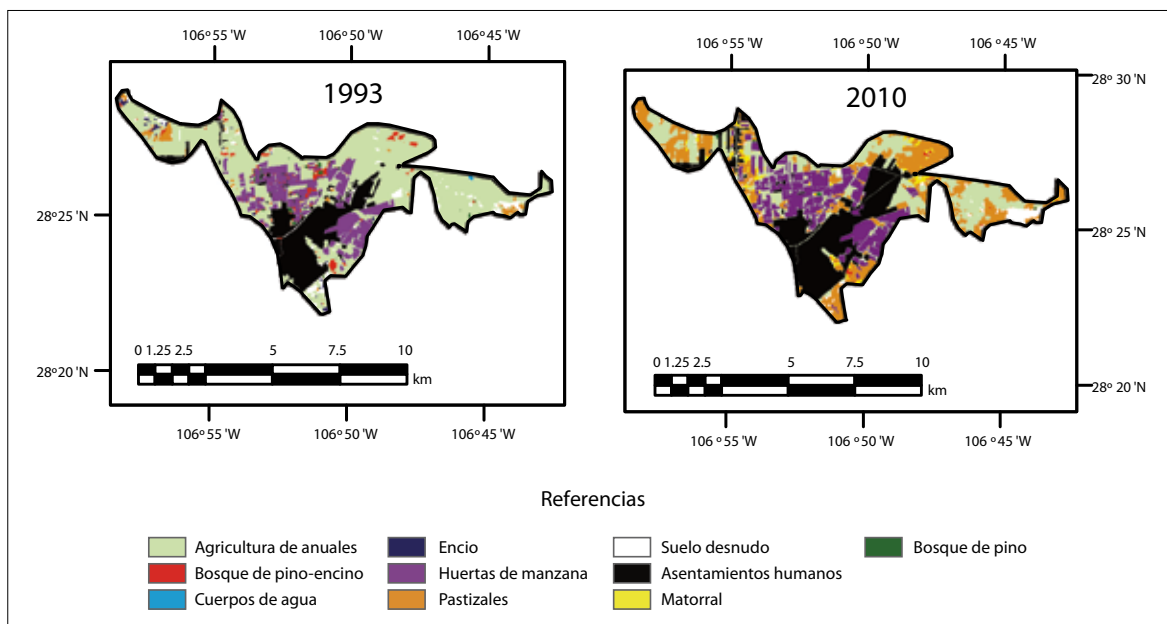
la imagen, y la realidad del terreno, por lo que vista la clasificación en conjunto, es posible establecer las tendencias de cambio en el área en estudio.

En la Figura 4 se muestran los cambios de uso y cobertura del suelo del área peri-urbana para los años 1993-2010.

Como se observa en la Figura 4, el uso de suelo urbano, color negro, se ha incrementado considerablemente. También destaca la disminución de agricultura de anuales entre 1993 y 2010, y su aparente conversión en áreas de pastizal. Otro incremento que es evidente corresponde a las huertas de manzana, con mayor área cubierta de 1993 a 2010. Las transiciones anteriores se indican en la Tabla 3.

Como se puede observar en la Tabla 3, entre 1993 y 2010, las nuevas coberturas confirman el patrón observado en la Figura 4. En éste sobresale el incremento de las áreas cubiertas por uso urbano (1 729.4 ha *vs* 2 454 en 1993 y 2010), pérdidas importantes de agricultura de anuales (6 080.4 ha *vs* 2 814.5 en 1993 y 2010), y el incremento sustancial de pastizales (186 ha *vs* 2 421.5) probablemente derivado del abandono de áreas de agricultura de anuales. Por el lado contrario al abandono de esta forma de agricultura, en la tabla también se confirma el incremento de la superficie cubierta por huertas de manzana, que pasan de 1 464.2 ha a 1 862.4 de 1993 a 2010.

Al igual que lo observado en otras áreas peri-urbanas del noroeste de México (Díaz y Sánchez, 2011), es muy probable que las transiciones de las clases agrícolas estén vinculadas con la presión de extracción de agua en el área peri-urbana, y las diferentes capacidades de respuesta para enfrentar este fenómeno. La competencia por el agua entre los usuarios urbanos y las áreas agrícolas adyacen-



Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Cambio de uso y cobertura de suelo en el área peri-urbana.

Tabla 3. Cambio de uso y cobertura de suelo en el área peri-urbana

Usos y coberturas de suelo (en hectáreas)		1993										
		Agricultura de anuales	Asociación pino-encino	Cuerpos de agua	Bosque de encino	Huertas de manzana	Pastizales	Suelo desnudo	Urbano	Matorrales	Bosque de pino	Total
2010	Agricultura de anuales	2 426.7	84.3	0.0	18.5	35.7	56.9	123.0	40.0	0.7	28.6	2 814.5
	Asociación pino-encino	19.9	14.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.6	38.1
	Huertas de manzana	446.9	22.8	0.0	6.8	1 366.9	0.3	2.4	3.5	0.2	12.7	1 862.4
	Pastizales	2 069.6	48.4	6.8	29.8	32.0	83.5	135.5	4.1	0.1	11.8	2 421.5
	Suelo desnudo	153.2	2.6	0.3	1.0	0.5	37.5	95.3	0.2	0.0	0.5	291.1
	Urbano	685.7	13.4	0.0	1.4	21.2	4.1	45.5	1 681.7	0.5	0.5	2 454.0
	Matorrales	265.1	41.3	0.6	0.0	8.2	4.2	6.8	0.0	0.0	1.5	327.8
	Bosque de pino	13.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	3.4	0.0	0.0	2.1	19.0
	Total	6 080.4	227.6	7.7	57.5	1 464.6	186.6	411.9	1 729.4	1.5	61.2	10 228.3

Fuente: elaboración propia.

tes a Ciudad Cuauhtémoc es muy alta (Enríquez, 2013), y solo los actores sociales con más capacidad de respuesta para reubicar sus pozos o hacer pozos más profundos, pueden enfrentar con cierta eficiencia este fenómeno (Chávez y Corral, 2013). Éste podría explicar el crecimiento en la cobertura de huertas de manzana, pues investigaciones recientes en el área indican que las huertas han crecido más entre los usuarios de agua subterránea que tienen más recursos (*Ibid.*).

El cultivo de manzana requiere el doble del agua por hectárea respecto a los cultivos de agricultura de anuales de la zona (maíz, frijol, avena; COLPOS, 2007), pero posee márgenes de rentabilidad tan elevados, que fácilmente se cubren los costos. Así, aunque el nivel estático descienda, un productor local de manzana tiene incentivos para ampliar su huerta, o se encuentra en ventaja frente a productores de otro tipo para comprar equipos de bombeo más potentes (Chávez y Corral, 2013). Bajo estas condiciones, el incremento en la cobertura de huertas es económicamente rentable, pero impone una competencia más fuerte por el agua subterránea frente a la demanda urbana y de la agricultura de anuales, que le vuelven inviable desde una perspectiva de sustentabilidad ambiental.

En el lado opuesto a los agricultores de manzana que pueden enfrentar el abatimiento del acuífero, se ubican los productores de agricultura de anuales que no pueden equiparse. A diferencia de aquéllos, éstos se ven obligados a abandonar sus predios agrícolas, o a reconvertir los usos del suelo hacia actividades menos demandantes de agua subterránea. En la zona, dicha agricultura se practica fundamentalmente por productores en pequeño, y estudios previos han documentado que algunos de los cultivos más representativos de agricultura de anuales de esta región implican bajos márgenes de rentabilidad (Carrera y Ayala, 2009). Esto facilita el abandono de los polígonos agrícolas, y explica que la tendencia de esta forma de agricultura sea consistente con lo encontrado por otros autores que abordaron el cambio de uso del suelo en zonas peri-urbanas. En la zona peri-urbana de Hermosillo Sonora, por ejemplo, el abandono de polígonos agrícolas obedece a las transferencias de agua hacia las zonas urbanas, siendo la conversión más notoria

entre productores agrícolas con poca capacidad para extraer agua del subsuelo, para reubicar sus pozos, o para impedir jurídicamente que se les cancele el acceso al agua (Díaz y Sánchez, 2011).

### **Zonas de presión sobre el agua subterránea**

Como se describió en la sección de métodos, para determinar las zonas de mayor presión en el área peri-urbana se utilizó el Método de Kernel. Considerando un radio de 5 km para analizar cada pixel observado, se calcularon las zonas de mayor presión dentro del área peri-urbana. Para facilitar la identificación de las zonas se determinaron tres clases: alta, media y baja, según el método de clasificación de Jenks o intervalos naturales.<sup>1</sup> Según estos criterios se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 5.

Como se observa en la Figura 5, hacia el centro del área peri-urbana es donde se concentra la presión de agua subterránea según el volumen concesionado. Esta distribución presenta valores altos en el centro y disminuye hacia las bordes del área peri-urbana. Esta información también es confirmada por el tipo de evolución del nivel estático que se presenta dentro de esta zona (abatimiento por arriba del promedio en 91-00 y en 79-91 en la Figura 3). Según la información registrada en REPDA y proporcionada por la Junta Municipal de Agua, los pozos, con los respectivos volúmenes anuales concesionados, que se ubican dentro de las zonas de alta y media presión, son mostradas en la Tabla 4.

La cantidad de pozos activos dentro de las zonas de presión es de 175 y según la información oficial extraen un volumen total de 21.33 hm<sup>3</sup>/año. El principal uso de agua es urbano con 12 hm<sup>3</sup>/año, lo cual equivale al 56%, seguido por el uso de agua agrícola con 8.64 hm<sup>3</sup>/año, es decir, el 40% del total de la extracción. Dentro de estas zonas de presión está ubicado el total de los pozos urbanos

<sup>1</sup> Jenks es un método de clasificación recomendado cuando no existe una distribución normal de los datos, como es el caso en las variables usadas en este estudio. Bajo este método, los datos se subdividen en varias clases, con límites de clase que permiten minimizar la varianza al interior de éstas, y maximizar la varianza entre clases distintas.

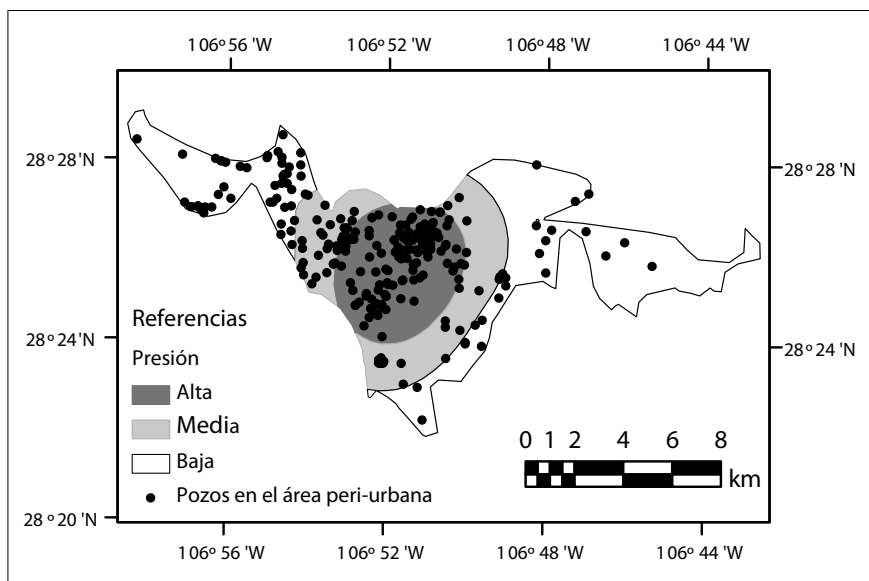


Figura 5. Zonas de presión en el área peri-urbana.

Fuente: elaboración propia.

y éstos ejercen una presión importante sobre la zona; sin embargo, la presión no es solo ejercida por los pozos urbanos, sino también por los pozos agrícolas, los cuales en su gran mayoría son usados para regar las huertas de manzana (SDUC, 2009).

Es importante destacar que los volúmenes de agua extraída probablemente están superados por las cantidades reales. Por ejemplo, si se considera que el consumo de agua por hectárea de cultivo de manzana es igual a 21 818.61 m<sup>3</sup> ha/año (COLPOS, 2007), el agua extraída para el sostenimiento de las 1 519.8 ha de huertas de manzana ubicadas dentro de las zonas de alta y media presión rebasa ampliamente el volumen autorizado en las concesiones para uso agrícola (8.64 hm<sup>3</sup>/año reportados *vs* 33.16 hm<sup>3</sup>/año calculados) e incluso es mayor a los consumos reportados para el área urbana (12 hm<sup>3</sup>/año). Queda claro que bajo esta situación, la competencia actual por el agua subterránea es intensa.

Dicha competencia no es nueva. Puede remontarse hasta el momento en que los niveles estáticos comenzaron a descender consistentemente, pero es en los tiempos actuales cuando adquiere connotaciones críticas. Desde principios de la década pasada no ha habido nuevas mediciones del nivel estático en todos los pozos del acuífero, pero las suspensiones frecuentes del servicio de agua en las colonias de las partes altas de Ciudad Cuauhtémoc,

Tabla 4. Extracción de agua subterránea en las zonas de presión

Tipos de usos	Cantidad de pozos	Volumen (m <sup>3</sup> )	Porcentaje respecto al total
Público urbano	17	12 000 000	56.24
Doméstico	7	11 336	0.05
Industrial	3	215 804	1.01
Agrícola	132	8 639 031	40.49
Servicios	1	110 300	0.52
Pecuario	1	17 117	0.08
Múltiples	14	342 113	1.60
Total	175	21 335 701	100

Fuente: elaboración propia con base en CONAGUA, 2010 y Junta Municipal de Agua, 2012.

las referencias verbales de los productores agrícolas locales, y los comentarios de los funcionarios responsables de la provisión de agua urbana, indican que la tendencia no se ha modificado. A partir de estas referencias, no obstante la asincronía de los datos de uso del suelo y de medición del nivel estático, en este trabajo se ha considerado válido relacionar los cambios de uso del suelo actuales con

la dinámica del acuífero reportada en la literatura. No hay reportes del nivel estático más recientes en la bibliografía, pero todo indica que las tendencias de abatimiento siguen vigentes.

## CONCLUSIONES

El área peri-urbana podría delimitarse como la superficie que rodea, a una distancia fija y un tanto arbitraria, la mancha urbana. Sin embargo, si pensamos el área peri-urbana en función de las extracciones de agua para uso urbano, lo peri-urbano puede abarcar un área geográfica diferente que la zona adyacente a la ciudad debido a que el agua puede ser transportada desde diversas zonas, no necesariamente adyacentes a la ciudad. En este estudio se propuso definir el área peri-urbana en función de las zonas donde el nivel estático del acuífero evolucionó de forma similar durante dos periodos. Esta propuesta no pretende brindar una única metodología para la delimitación del área peri-urbana, sino busca enfatizar, sin agotar el tema, la importancia de considerar el área peri-urbana tomando en cuenta los recursos hídricos para analizar de forma más integral todos los efectos del crecimiento urbano en el cambio de uso y cobertura de suelo.

El crecimiento económico y poblacional de las ciudades del norte de México ha traído consigo una fuerte presión sobre los recursos naturales. Particularmente, la demanda de agua para uso urbano se ha convertido en un gran reto para su desarrollo. Este reto es evidente en la competencia entre las ciudades y el campo por el acceso al líquido. Las ciudades del norte de México, ubicadas en climas desérticos o semidesérticos, demandan cada vez más agua, la cual, sin duda, será transferida desde otros usos, como la agricultura. En este caso, quedó evidenciada una fuerte competencia entre los usos de agua y suelo agrícolas y urbanos. En este caso, tanto la distribución del suelo como del agua demuestran esta competencia y de ahí la importancia de analizar cómo se combinan suelo y agua en un mismo espacio.

La transferencia de agua hacia las ciudades puede tener efectos considerables en el uso y cobertura

del suelo que rodea los sitios de extracción de agua, al disminuir el agua disponible para otros usos, en especial para la agricultura, causando el abandono de tierras de uso agrícola. Sin embargo, según se demuestra en este caso, la transferencia de agua agrícola a la ciudad es diferenciada. Mientras la agricultura de anuales disminuyó drásticamente en un periodo de casi dos décadas, las huertas de manzana no solo persistieron, sino aumentaron considerablemente en el área peri-urbana. Esta diferencia tiene su explicación en la capacidad de equipamiento de los pozos e implementación de riegos más eficientes, lo cual a su vez tiene relación con el capital financiero con que cuentan los diferentes usuarios.

A diferencia de lo que se ha documentado en otras regiones del noroeste del país, la competencia por el agua en el área en estudio responde en buena medida a la intensidad del uso agrícola. Las evidencias indican que la agricultura se apropia de una proporción importante del agua, compitiendo intensamente con la demanda urbana. En este proceso hay formas de agricultura que tienen mayores limitaciones de acceso al agua subterránea, y las diferencias se traducen en una reconfiguración espacial de los usos del suelo agrícola en el área peri-urbana. Esto se evidencia localmente en el abandono de la agricultura de anuales y su conversión a otros usos, y en la ampliación de la cobertura de huertas de manzana, pese a que el agua es escasa.

Procesos como el documentado en este trabajo, hacen evidente la complejidad de las interacciones por el uso del agua en las zonas peri-urbanas. Cada escenario geográfico es distinto, y debe analizarse por separado para orientar de manera sustentable las actividades humanas en esta zona de transición. Puesto que el acuífero se constituye por un fluido que presenta alto dinamismo, nuevas evaluaciones de uso del suelo deben realizarse para comprender las tendencias futuras del cambio de coberturas en el área peri-urbana.

## AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece el apoyo otorgado para la realización de este estudio en parte por el Instituto

Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI) CRN3056 que es apoyado por la Fundación Nacional de Ciencias de Estados Unidos (Grant GEO-1128040).

Los autores agradecen el apoyo del Programa para el Mejoramiento del Profesorado (PROMEP) de México.

## REFERENCIAS

- Aguilar, I. y M. Mathis (2005), "Agua y desarrollo económico en la región binacional del bajo río Grande/ río Bravo, Estados Unidos/México", en Cortez, A. A., S. Whiteford y M. Chávez (eds.), *Seguridad, agua y desarrollo: el futuro de la frontera México-Estados Unidos*, El Colegio de la Frontera Norte (COLEF), Tijuana, México, pp. 99-124.
- Angel, S., S. C. Sheppard and D.L. Civco (2005), *The dynamics of global urban expansion. Transport and urban development Department of the World Bank* [recuperado el 11 de mayo de 2009 de <http://web.worldbank.org>].
- Bakker, K. J. (2003), *An uncooperative commodity: privatizing water in England and Wales*, Oxford University Press, New York.
- Baxter, M. and C. Beardah, C. (1997), "Some archaeological applications of kernel density estimates", *Journal of Archaeological Science*, no. 24, pp. 347-354.
- Bogardi, J., D. Dudgeon, R. Lawford, E. Flinkerbusch, A. Meyn, C. Pahl-Wostl, K. Vielhauer and C. Vörösmarty (2012), "Water security for a planet under pressure: interconnected challenges of a changing world call for sustainable solutions", *Current Opinion in Environmental Sustainability*, vol. 4, no. 1, pp. 35-43.
- Carrera, B. y A. Ayala (2009), "Competitividad de la producción de frijol en Chihuahua", *Chihuahua Hoy*, VII, pp. 335-369.
- Chávez Bustillos, A. E. y J. A. Corral Alvarado (2013), *Relaciones espaciales entre los cambios del nivel piezométrico del acuífero Cuauhtémoc, Chihuahua y la cobertura de huertas de manzana durante 1993-2003*, tesis de Licenciatura en Geoinformática, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Unidad Multidisciplinaria de Ciudad Cuauhtémoc.
- COLPOS (2007), *Plan Director Unión de Asociaciones de Usuarios de Aguas Subterráneas del Acuífero de Cuauhtémoc, Chihuahua*, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- CONAPO (2009), *De la población de México 2005-2050*, Consejo Nacional de Población [recuperado el 9 de octubre de 2009 de <http://www.conapo.gob.mx>].
- Cortez, A., S. Whiteford y M. Chávez (2005), "Introducción", en Cortez, A., S. Whiteford y M. Chávez (eds.), *Seguridad, agua y desarrollo: el futuro de la frontera México-Estados Unidos*, El Colegio de la Frontera Norte (COLEF), Tijuana, México, pp. 9-24.
- Cosgrove, W. J. and F. R. Rijsberman (2000), *World water vision: making water everybody's business*, Earthscan Publications Ltd.
- CONAGUA (2010), *Registro Público de Derechos de Agua*, Comisión Nacional del Agua [recuperado el 15 de octubre de 2010, de [www.conagua.gob.mx](http://www.conagua.gob.mx)].
- CONAGUA (2009), *Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea acuífero (0805) Cuauhtémoc, Chihuahua*, Comisión Nacional del Agua [recuperado a partir de <http://www.conagua.gob.mx>].
- CONAGUA (1991), *Actualización del estudio geohidrológico, políticas de operación y proyecto de manejo del acuífero del Valle de Cuauhtémoc, Chihuahua*, Comisión Nacional del Agua, Contrato CNA-GRN-90-009.
- CONAGUA (2000), *Cuantificación de la extracción de agua subterránea en el acuífero de Cuauhtémoc Chihuahua*, Comisión Nacional del Agua, Contrato GAS-011-PRO-2000, tomo 1.
- Congalton, R. G. and K. Green (1999), *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices*, Lewis Publishers. Florida, USA.
- Chuvieco, E. (2008), *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio*, Ariel, Barcelona.
- Crossman, N., B. Bryan, B. Ostendorf and S. Collins (2007), "Systematic landscape restoration in the rural-urban fringe: meeting conservation planning and policy goals", *Biodiversity and Conservation*, vol. 16, no. 13, pp. 3781-3802.
- Díaz Caravantes, R. E. y E. Sánchez Flores (2011), "Water transfer effects on peri-urban land use/land cover: A case study in a semi-arid region of Mexico", *Applied Geography*, vol. 31, no. 2, pp. 413-425.
- Díaz Caravantes, R. E. y C. A. Scott (2010), "Water management and biodiversity conservation interface in Mexico: A geographical analysis", *Applied Geography*, vol. 30, no. 3, pp. 343-354.
- Enriquez Venzor, J. C. (2013), *Análisis de la competencia de gasto de agua en Cd. Cuauhtémoc, Chihuahua y las Huertas de Manzana colindantes con la Mancha Urbana de la Ciudad*, tesis de Licenciatura en Geoinformática, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Unidad Multidisciplinaria de Ciudad Cuauhtémoc.
- García Mora, T. y J. F. Mas (2009), "Comparación de metodologías para el mapeo de la cobertura y uso del suelo en el sureste de México", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 67, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 7-19.

- Herold, M., N. C. Goldstein and K. C. Clarke (2003), "The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modeling", *Remote Sensing of Environment*, vol. 86, no. 3, pp. 286-302.
- INEGI (2010), *Censo de población y vivienda 2010*, Instituto Nacional de Geografía y Estadística.
- Junta Municipal de Agua (2012), *Relación de los pozos urbanos de Ciudad Cuauhtémoc*, documento no publicado.
- Lillesand, T. and R. Kiefer (2003), *Remote sensing and image interpretation*, Wiley, New York.
- McGregor, D., D. Simon and D. Thompson (2006), "The peri-urban interface in developing areas: the research agenda", en McGregor, D., D. Simon and D. Thompson (eds.), *The Peri-Urban Interface: Approaches to Sustainable Natural and Human Resource Use*, Earthscan Publications Ltd., U.K., pp. 313-325.
- ONU-HABITAT (2011), *Estado de las ciudades de México 2011*, Naciones Unidas-HABITAT – SEDESOL, México.
- Pontius, R. G. Jr., E. Shusas and M. McEachern (2004), "Detecting important categorical land changes while accounting for persistence", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, no. 101, pp. 251-268.
- Rindfuss, R. R., S. J. Walsh, B. L. Turner, J. Fox and V. Mishra (2004), "Developing science of land change: challenges and methodological issues", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 101, no. 39, pp. 13976-13981.
- Rosegrant, M. W., X. Cai y S. A. Cline (2002), *Global water outlook to 2025: Averting an impending crisis*, IFPRI-2020 Vision/International Water Management Institute, Washington D.C., USA.
- Sánchez Flores, E. and S. R. Yool (2007), "Sensitivity of change vector analysis to land cover change in an arid ecosystem", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 28, no. 5, pp. 1069-1088.
- SARH (1973), *Estudio geohidrológico preliminar en la zona de Cuauhtémoc, Chihuahua*, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, cartografía no publicada.
- SDUC (2009), *Plan de Desarrollo Urbano de Centro de Población: Ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua*, Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología del Municipio de Cuauhtémoc, documento no publicado.
- Silverman, B. (1986), *Density estimation for statistics and data analysis*, Chapman and Hall, New York.
- United Nations (2009), *World urbanization prospects: The 2007 revision population database*, [recuperado el 9 de octubre de 2009 de <http://esa.un.org/unup/>].
- Vasishth, A. and D. Sloane (2002), "Returning to ecology: an ecosystem approach to understanding the city", en Dear, M., *From Chicago to LA: Making Sense of Urban Theory*, Sage Publications, Thousand Oaks, CA, pp. 343-366.
- World Watch Institute (2007), *State of the World 2007: Our Urban Future*, A Worldwatch Institute Report on Progress Toward a Sustainable Society W.W. Norton.
- Yuan, F. (2008), "Land-cover change and environmental impact analysis in the Greater Mankato area of Minnesota using remote sensing and GIS modeling", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 29, no. 4, pp. 1169-1184.