

Análisis geoespacial en los estudios urbanos

Judith Ley García
Jean-François Mas
(coordinadores)



Universidad Autónoma de Baja California

Dr. Daniel Octavio Valdez Delgadillo
Rector

Dr. Edgar Ismael Alarcón Meza
Secretario General

Dra. Mónica Lacavex Berumen
Vicerrectora Campus Ensenada

Dra. Gisela Montero Alpírez
Vicerrectora Campus Mexicali

Mtra. Edith Montiel Ayala
Vicerrectora Campus Tijuana

Dra. Margarita Bajaras Tinoco
Directora del Instituto de Investigaciones Sociales

Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Enrique Luis Graue Wiechers
Rector

Dr. Leonardo Lomelí Vanegas
Secretario General

Dr. William Henry Lee Alardin
Coordinador de la Investigación Científica

Dr. Antonio Vieyra Medrano
Director del CIGA

Dra. Yadira Mireya Méndez Lemus
Secretaria del CIGA

Dr. Luis Miguel Morales Manilla
Secretaria Técnico del CIGA

Dr. Francisco Javier Tapia R-Esparza
Comité Editorial del CIGA

Sociedad Latinoamericana de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial – México

Mesa directiva 2016-2017

Dr. Luis Carlos Alatorre Cejudo
Presidente

Dr. Luis Carlos Bravo Peña
Secretario

M.C. Lara Cecilia Wiebe Quintana
Tesorera

ANÁLISIS GEOESPACIAL EN LOS ESTUDIOS URBANOS

Judith Ley García
Jean-François Mas
(coordinadores)

Universidad Autónoma de Baja California
Universidad Nacional Autónoma de México
Sociedad Latinoamericana de Percepción Remota
y Sistemas de Información Espacial

Análisis geoespacial en los estudios urbanos [recurso electrónico] / Judith Ley García, Jean Francois Mas (coordinadores). -- Mexicali, Baja California : Universidad Autónoma de Baja California ; México, D.F. : Universidad Nacional Autónoma de México ; Cuauhtémoc, Chihuahua: Sociedad Latinoamericana de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial, 2019.

I recurso en línea

ISBN: 9786076075340

ISBN: 9786073016049

ISBN: 9786075540009

1. Sistemas de información geográfica. 2. Percepción remota -- México. 3. Asentamientos urbanos -- Innovaciones tecnológicas. I. Ley García, Judith, coord. II. Mas, Jean Francois, coord. III. Universidad Autónoma de Baja California. IV. Universidad Nacional Autónoma de México. V. Sociedad Latinoamericana de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial

G70.5 .M6 A53 2019

Nota de arbitraje: Esta obra fue dictaminada por pares académicos especialistas en cada tema en la modalidad doble ciego y fue aprobada para su publicación.

Análisis geoespacial en los estudios urbanos

D.R. © 2019 Universidad Autónoma de Baja California

Av. Álvaro Obregón y Julián Carrillo s/n, colonia Nueva,
Código Postal 21100, Mexicali, Baja California, México.

D.R. © 2019 Universidad Nacional Autónoma de México

Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, C.P. 04510, México, Distrito Federal.
Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental
Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701. Col. Exhacienda de San José de la Huerta
58190. Morelia, Michoacán, México.

**D.R. © 2019 Sociedad Latinoamericana de Percepción Remota y
Sistemas de Información Espacial**

Yunuen, 231 Colonia Felix Ireta
58070. Morelia, Michoacán, México.

Coordinadores: Judith Ley García y Jean-François Mas Caussel

Cuidado de la edición: Judith Ley García

Formación: Mónica Judith Ochoa García

Diseño de portada: Pamela Lozano Rivera



ISBN de las entidades coeditoras

UABC: 978-607-607-534-0

UNAM: 978-607-30-1604-9

SELPER: 978-607-554-000-9

Versión: Electrónica: Internet/PDF

ÍNDICE

Introducción.....	9
-------------------	---

EL ESTUDIO DEL CRECIMIENTO URBANO

Posibilidades y limitaciones de la interferometría radar (InSAR) con imágenes de una y dos polarizaciones para el monitoreo de áreas urbanas. Caso de Estudio: Zona Metropolitana del Valle de México	15
---	----

Danilo Andrés Sosa Ruiz, Alejandra Aurelia López Caloca y Stéphane Robert André Couturier

Importancia del monitoreo en 3D para la gestión urbana eficiente: Un caso de estudio que analiza condiciones topográficas previas a la urbanización	39
---	----

Fabiola D. Yépez Rincón, Diego Fabián Lozano García y Carlos Aguilar Treviño

Análisis de la dinámica de los usos de suelo y del crecimiento urbano de los municipios de Culiacán y Navolato, Sinaloa, México	61
---	----

Geovanna Guadalupe Hinojosa Castro y Wenseslao Plata Rocha

Simulación del cambio de uso de suelo en la ciudad de Ensenada, Baja California, México	77
---	----

Carlos Iván Salinas Espinosa, Bernardino Ricardo Eaton González, Martha Ileana Espejel Carbajal y Claudia Leyva Aguilera

Modelo prospectivo de crecimiento periurbano para una ciudad media. El caso de Morelia, Michoacán.....	99
--	----

Sandra Lasso de la Vega, Jean-François Mas y Antonio Vieyra Medrano

EL ESTUDIO DEL RIESGO URBANO

El enfoque crítico del análisis geoespacial. Deconstruyendo la vulnerabilidad en una comunidad afectada por inundaciones en la ciudad de Morelia.....	125
---	-----

Frida Güiza Valverde y Michael K. McCall

Procesos de subsidencias en la ciudad de Toluca y alrededores asociados a la sobreexplotación de los mantos acuíferos. Una aproximación a partir de correlación de técnicas radar y datos geológicos superficiales	147
--	-----

Denisse Avalos Ortiz, Norma Dávila Hernández, José Luis Expósito Castillo, Noel Pineda Jaimés y Xanat Antonio Némiga

Zonificación climático-ambiental urbana mediante la integración de técnicas de teledetección satelital, geoestadística y SIG	171
--	-----

Cristián Gonzalo Henríquez Ruiz, John Treimun Ríos y Jorge Rolando Quiñense Abarzua

Evaluación multi peligro de las instalaciones críticas en la ciudad de Mexicali	201
---	-----

Judith Ley García

INTRODUCCIÓN

El libro *Análisis geoespacial en los estudios urbanos* surge como propuesta de trabajo de la Sociedad Latinoamericana de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial (SELPER) capítulo México, en el marco de la XX reunión nacional. Esta sociedad tiene como objetivo principal promover actividades relacionadas con la percepción remota y las ciencias espaciales, de tal forma que congrega a personas y entidades que se interesan en la investigación, desarrollo, aplicación y divulgación del análisis geoespacial (SELPER, 2012). Para el desarrollo de esta obra en particular, SELPER lanzó una convocatoria entre sus miembros pertenecientes al sector académico, con el propósito de reunir diversos trabajos que aborden el estudio de las ciudades latinoamericanas, apoyados en el análisis geoespacial.

La ciudad es el hábitat del hombre por excelencia, particularmente a partir de la segunda mitad del siglo XX, cuando los procesos de industrialización y modernización de la sociedad, intensificaron la concentración de la población mundial en las ciudades a un ritmo hasta entonces desconocido. Esta situación se presentó particularmente en los países de América Latina y el Caribe donde la urbanización se convirtió en un fenómeno insólito e irrefrenable (Panadero, 2001), transformando esta región en la más urbanizada del mundo, con 80% de su población viviendo en las ciudades (ONU-Habitat, 2012).

Si bien, el ritmo de crecimiento poblacional en las ciudades ha disminuido en las últimas décadas, éstas siguen expandiéndose de forma acelerada, rebasando frecuentemente los límites administrativos y la capacidad local de gestión del territorio, dando lugar a formas urbanas cada vez más complejas, de grandes dimensiones y dispersión espacial, con una organización caótica que se manifiesta en múltiples problemas sociales, ambientales y económicos. En otras palabras, las ciudades latinoamericanas crecen rápidamente y junto con ellas la desigualdad y los riesgos de desastre

(UNFPA, ISDR, & ONU Habitat, 2012; PNUMA, 2002). Por consiguiente, la sostenibilidad urbana plantea nuevos desafíos de planeación y gestión del territorio (ONU Habitat, 2012), y requiere de importantes esfuerzos multidisciplinarios para lograr una mejor comprensión, explicación y predicción de estos fenómenos geográficos.

Afortunadamente, en las últimas décadas, la evolución de las tecnologías de información y comunicación ha diversificado las posibilidades de acercarse a la comprensión del fenómeno urbano desde una perspectiva geográfica. El desarrollo de un amplio abanico de tecnologías geoespaciales, como los sistemas de información geográfica, sensores remotos, sistemas de posicionamiento global y programas de cómputo, que permiten la adquisición, gestión y explotación de datos georreferenciados, ha brindado una amplia gama de herramientas para el análisis de fenómenos espaciales complejos, como lo son las ciudades.

En este sentido, la presente obra es un esfuerzo colectivo que pretende contribuir en la comprensión de la complejidad urbana desde el análisis del crecimiento y el riesgo urbanos de diversas ciudades latinoamericanas, mediante la utilización de variados métodos, técnicas y tecnologías geoespaciales.

DEL CONTENIDO DEL LIBRO

El libro se estructura en dos grandes apartados, el primero de ellos, *El estudio del crecimiento urbano*, incluye cinco capítulos que se enfocan al análisis del crecimiento de las ciudades; mientras que en el segundo, *El estudio del riesgo urbano*, se agrupan cuatro contribuciones que abordan aspectos sobre el riesgo en las ciudades.

En el primer apartado, Danilo Sosa, Alejandra López y Stéphane Couturier exploran la posibilidad del monitoreo del crecimiento urbano de la Zona Metropolitana del Valle de México mediante el uso de imágenes de radar de apertura sintética; Mientras que, Fabiola Yépez, Diego Lozano y Carlos Aguilar, proponen el monitoreo intra-urbano 3D en la ciudad de Monterrey, Nuevo León, utilizando tecnología láser. Por su parte, Geovanna Hinojoza y Wenseslao Plata construyen un sistema de información geográfica para analizar el crecimiento urbano a partir de los cambios en los usos de suelo de los municipios de Navolato y Culiacán, Sinaloa. En este mismo sentido, Carlos Salinas, Ricardo Eaton, Ileana Espejel y Claudia Leyva identifican las tendencias de crecimiento urbano de Ensenada, Baja California, a partir de la modelación espacial de los cambios de uso de suelo; y Sandra Lasso, Jean F. Mas y Antonio Vieyra exploran un modelo prospectivo de crecimiento periurbano en la ciudad de Morelia, Michoacán.

En el segundo apartado, Frida Güiza y Michael McCall presentan un prototipo de plataforma web para el monitoreo y respuesta a emergencias en comunidades afectadas por inundaciones en la ciudad de Morelia, Michoacán; mientras que Denisse Avalos, Norma Dávila, José Luis Expósito

y Brisa Carrasco, utilizan técnicas radar para analizar los procesos de subsidencia de la ciudad de Toluca, Estado de México. Por su parte, Cristián Henríquez, John Treimun y Jorge Qüense, utilizan métodos geoestadísticos y de teledetección para reportar la calidad climático-ambiental intra urbana de Chillán y Antofagasta, Chile, en el contexto del cambio climático. Finalmente, Judith Ley mediante un sistema de información geográfica, identifica el nivel de exposición que presentan las instalaciones críticas de la ciudad de Mexicali, Baja California, al conjunto de peligros del lugar.

REFERENCIAS

- UNFPA, ISDR, & ONU Habitat (Fondo de Población las Naciones Unidas, Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos y Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres) (2012). *Vínculos entre las dinámicas demográficas, los procesos de urbanización y los riesgos de desastres: Una visión regional de América Latina*. Recuperado de http://www.unisdr.org/files/31104_doc18918contenido.pdf
- ONU-Habitat (Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos) (2012). *Estado de las ciudades de América Latina y el Caribe 2012. Rumbo a una nueva transición urbana*. Brasil: ONU-Hábitat.
- Panadero, M. (2001). El proceso de urbanización de América Latina durante el período científico-técnico. Bibliografía básica. *Biblio 3w. Revista bibliográfica de geografía y ciencias sociales*, 298. Recuperado de <http://www.ub.edu/geocrit/b3w-298.htm>
- PNUMA (Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente) (2002). *Perspectivas del medio ambiente mundial 2002. Geo-3*. Madrid: Earthscan.
- SELPER (Sociedad Latinoamericana de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial) (2012) *¿Qué es SELPER?* Recuperado de <http://www.selper.org.mx/conocenos.html>

EL ESTUDIO DEL CRECIMIENTO URBANO

POSIBILIDADES Y LIMITACIONES DE LA INTERFEROMETRÍA RADAR (INSAR) CON IMÁGENES DE UNA Y DOS POLARIZACIONES PARA EL MONITOREO DE ÁREAS URBANAS. CASO DE ESTUDIO: ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO

Danilo Andrés Sosa Ruiz, Alejandra Aurelia López Caloca*
y Stéphane Robert André Couturier**

INTRODUCCIÓN

A partir del año 2008, por primera vez en la historia de la humanidad más de la mitad de la población mundial reside en ciudades (Naciones Unidas, 2008; Yu, Hay-Man, Jung, & Ge, 2008). Sólo en los últimos 50 años el número de ciudades con más de 10 millones de habitantes (también llamadas mega ciudades) pasó de 4 a 22, y para el año 2025 se estima un total de 37 (Taubenböck, Wegmann, Berger, & Breunig, 2008; Olawole, Msimanga, Adegboyega, & Adesina, 2011). La mayor parte de este crecimiento ocurre en América Latina, Asia y África, donde habita 80% de la población mundial. En lo que respecta específicamente a América Latina, cerca de 420 millones de personas ya viven en ciudades; de esta manera, entre las regiones de países menos industrializados, hoy en día es la más urbanizada del planeta (Worldwatch Institute, 2012). A gran escala el crecimiento urbano puede ser considerado como uno de los procesos que más transforman de manera irreversible el espacio geográfico (Taubenböck et al., 2008). Este fenómeno requiere un seguimiento continuo desde una perspectiva multidisciplinar que permita evaluar cómo se está dando la expansión de los asentamientos humanos, cuál es y será su impacto, cómo se podría mi-

* Centro de Investigación en Geografía y Geomática “Ing. Jorge L. Tamayo”, soruiz@comunidad.unam.mx y alopez@centrogeo.org.mx

** Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, andres@igg.unam.mx

tigar y también qué escenarios tienen mayor probabilidad (Ban & Niu, 2010; Olawole et al., 2011). Sin embargo, de forma paralela a la evolución del crecimiento urbano, existe una carencia significativa en los países menos industrializados: la falta de sistematización y las limitaciones para la recolección y procesamiento de datos geográficos (Reyes & Parás, 2012).

Así, en el caso específico de México, el Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI) sólo cuenta con dos tipos de información cartográfica de las áreas urbanas. La primera, de corte temático, pertenece a los mapas de uso de suelo a escala 1:50,000 y consiste solamente en los contornos de los núcleos urbanos (Couturier, Ricárdez, Osorno, & López, 2011). La segunda, mucho más detallada, es la cartografía de localidades. Esta información de tipo vectorial se actualiza cada 10 años, puesto que su único propósito es dar soporte a los programas censales (INEGI, s/f). En el caso de México, actualizar la información geográfica de las áreas urbanas no ha sido un procedimiento completamente exitoso debido, en primer lugar, al costo que suponen las técnicas tradicionales basadas en métodos fotogramétricos y/o dependientes del trabajo en campo; en segundo, a la falta de métodos menos subjetivos, cuya exactitud y precisión dependa de una secuencia de trabajo replicable más que de la pericia de un intérprete; y en tercero, a la falta de una consistencia en las herramientas y técnicas que permita comparar la información dentro de una secuencia espacio-temporal.

Para el caso específico de México, entonces, no hay duda alguna en señalar la disparidad entre el crecimiento urbano de los asentamientos humanos y la evolución de las acciones gubernamentales para su gestión, pues se trata en casi todos los casos de acciones inconclusas, onerosas y poco exitosas para la planeación del territorio (García, 2010). Ante este panorama, contar con una cartografía actualizada de las ciudades siempre será una necesidad imperante para la formulación de las políticas públicas enfocadas al desarrollo ecológico, cultural, económico y social, que en conjunto conforman el instrumento técnico-político del ordenamiento territorial (Palacio-Prieto, Sánchez, & Casado, 2004). Esto se debe, por un lado, a la importancia de conocer las dinámicas del crecimiento urbano asociadas a procesos espaciales, tales como los cambios en la extensión de la ciudad y en los usos de suelo, el aumento de la densidad y la aparición de nuevos asentamientos (Aguilar & Escamilla, 2011); y por otro, a estrategias con un enfoque espacial, entre las que se encuentran la planeación de la expansión urbana, el manejo de recursos naturales, e incluso la gestión del riesgo (Commission of the European Communities, 1995).

En este contexto, para poder generar y actualizar la cartografía de los asentamientos humanos de manera replicable las imágenes de Radar de Apertura Sintética, o SAR por sus siglas en inglés, representan un material importante a considerar (Archer, 1999). A diferencia de otras fuentes de información más utilizadas, las imágenes SAR, al igual que cualquier otra imagen de satélite, abarcan una mayor área a un costo menor y con una frecuencia que puede definirse entre días, meses

y años. Como los sistemas de radar tienen su propia fuente de energía, a diferencia de los sensores pasivos no son afectados ni dependen tampoco de las condiciones atmosféricas. Esto permite tener no sólo mayor fiabilidad para la comparación entre dos o más imágenes SAR, sino también, mayor continuidad de la información en intervalos de tiempo definidos (Soergel, 2010). Asimismo, con respecto a otros productos satelitales, especialmente los generados por sensores pasivos, las imágenes de radar presentan unas ventajas significativas para el monitoreo del crecimiento urbano. En las imágenes SAR se almacena información relativa a la respuesta de la superficie terrestre ante varios barridos de ondas electromagnéticas emitidas y recibidas por un sistema radar (Kipkemboi, 2012; Lira, 2002). Dicha información depende en diferente medida de la humedad, la textura, el material y la geometría de la superficie y objetos con los que interactúa el sistema radar, así como de la longitud y la polarización de las ondas que emite y recibe el sensor. Dependiendo del gran rango de resoluciones espaciales que existen hoy en día en las imágenes SAR, desde 20m hasta 0.5m, es posible hacer una caracterización edificio por edificio o bien un análisis de la configuración geométrica o estructural de los asentamientos humanos (Dell'Acqua & Gamba, 2003), en beneficio de mayores detalles y posibilidades para el estudio de las áreas urbanas.

CRECIMIENTO URBANO, TELEDETECCIÓN Y GEOMÁTICA

Para definir qué es el proceso de urbanización es posible retomar, entre las aproximaciones más sólidas y que no son excluyentes entre sí, tres puntos de vista específicos. El primero, que tiene un fuerte sustento en el materialismo histórico, afirma que el proceso de urbanización se caracteriza por una transferencia de la fuerza de trabajo del sector primario hacia los sectores no agrícolas (Lefebvre, 1975; Garza, 1985); el segundo, formulado desde la sociología urbana, asevera que el proceso de urbanización debe entenderse a partir de un “modo de vida” delimitado cualitativamente por prácticas, relaciones y actitudes (Schnore, 1964; Wirth, 2005); y el tercero, sustentado en el urbanismo y la geografía urbana, identifica el proceso de urbanización como la evolución de la concentración espacial según determinados límites de densidad y extensión de los asentamientos humanos (Elridge, 1942; Castells, 2006). Más a detalle es posible notar que la primera aproximación identifica urbanización con industrialización. La segunda es enteramente cualitativa, pues define lo urbano a partir de la aparición de un conjunto de prácticas sociales que se sustentan en un sistema de valores y una ideología específicos. Finalmente, la tercera es tanto cuantitativa como cualitativa, ya que determina y caracteriza el proceso de urbanización a partir de unidades medibles de tamaño y concentración, pero también a partir de categorías y clasificaciones. De las tres aproximaciones mencionadas, esta última es la única enteramente basada en el espacio geográfico.

El término urbanización engloba entonces un conjunto de procesos sociales, económicos y políticos que se dan en un tiempo y espacio determinados, y que definen la manera como un grupo humano se asienta en un territorio. De acuerdo con esto, es importante aclarar que el proceso

de urbanización es algo mucho más amplio y extenso que la noción de crecimiento urbano. Más propiamente, el crecimiento urbano es su manifestación cuantitativa y cualitativa en el espacio geográfico, determinada por un aumento de los asentamientos humanos tanto en extensión de área así como en concentración de infraestructura e individuos. Una de las estrategias que han aparecido para conocer, supervisar y evaluar el crecimiento urbano es el monitoreo (Taubenböck & Esch, 2011). Esta estrategia tiene una dimensión técnica, que depende de los instrumentos y herramientas, y una dimensión epistemológica, que depende de la formación de conocimiento sobre la ciudad. Principalmente en el dominio de la política pública y de la planeación territorial, el caso específico del monitoreo del crecimiento urbano es relevante por varias razones: permite sistematizar y actualizar toda la información relativa a los usos del suelo y de la infraestructura; puede dar cuenta del estado actual de los recursos naturales en las áreas urbanas; tiene aplicaciones en materia de seguridad civil y de manejo de riesgos; permite medir temporalmente los cambios y continuidades en el espacio; y por último, ofrece un registro de información que pueda organizarse y clasificarse para planes y programas.

En este sentido, el monitoreo del crecimiento urbano está definido por una observación multitemporal, y puede sugerirse también multiescalar, del espacio geográfico que ocupa una ciudad (Nolè, Lanorte, Murgante, & Lasaponara, 2012). Su contexto es transdisciplinar ya que a través del monitoreo del crecimiento urbano se genera una amplia producción de conocimiento en distintos niveles y para diversos fines. El método tradicional para el monitoreo del crecimiento urbano ha sido la fotointerpretación de imágenes aéreas (Vu, Yamazaki, & Matsuoka, 2009). Sólo recientemente, gracias al desarrollo tecnológico de las imágenes de satélite y a su difusión, la teledetección ha posibilitado la aparición de nuevas herramientas, metodologías e instrumentos para el estudio de los fenómenos sobre la superficie terrestre, incluido evidentemente el desarrollo de las áreas urbanas. En este contexto, la teledetección aplicada al monitoreo del crecimiento urbano puede estar orientada a la generación de nueva información, o bien a la actualización de la existente (Santos, Freire, & Tenedório, 2011). Su contexto, tal como señalan Taubenböck y Esch (2011), es que la cartografía de las ciudades tiende a ser inadecuada, sin formato, obsoleta, dudosa, o en el peor de los casos inexistente. Es importante mencionar, finalmente, que los límites de la teledetección son bastante precisos, pues su objetivo principal no es otro que transformar las imágenes, que son datos, en información temática (Taubenböck & Esch, 2011). Esto, aplicado al monitoreo de las áreas urbanas, significa que el uso de la información geográfica derivada de imágenes de satélite responderá de manera diferente según los objetivos y disciplinas a partir de los cuales se utilice y, por lo tanto, requiere de un enfoque o una perspectiva específica que enmarque su uso, manejo, análisis y resultados.

El entorno general en que se desarrolla esta investigación está enmarcado por el crecimiento ur-

bano, el cual, siendo un fenómeno de carácter territorial, está acompañado por un problema específico: la falta de información geoespacial sobre los asentamientos humanos. En el caso de México no han existido los mecanismos suficientes para solventar dicha carencia de información debido a la falta de un enfoque específico que permita proponer una solución con la cual: (1) se disminuyan los costos de generación de la información aprovechando los avances de las ciencias aplicadas; (2) se elimine la dependencia de una interpretación; (3) se proponga una metodología susceptible de ser replicada; y (4) se posibiliten las comparaciones entre datos dentro de una secuencia determinada. En aras de atender el problema buscando cumplir con estos requisitos, la solución propuesta debe ser de carácter científico para responder, de acuerdo a la enumeración anterior, así: (1) con base en el desarrollo tecnológico; (2) inscrita en un marco de objetividad; (3) siguiendo la replicabilidad como una de las condiciones del método científico; y (4) con una mayor consistencia de métodos y técnicas, uniformidad de fuentes y disponibilidad de información.

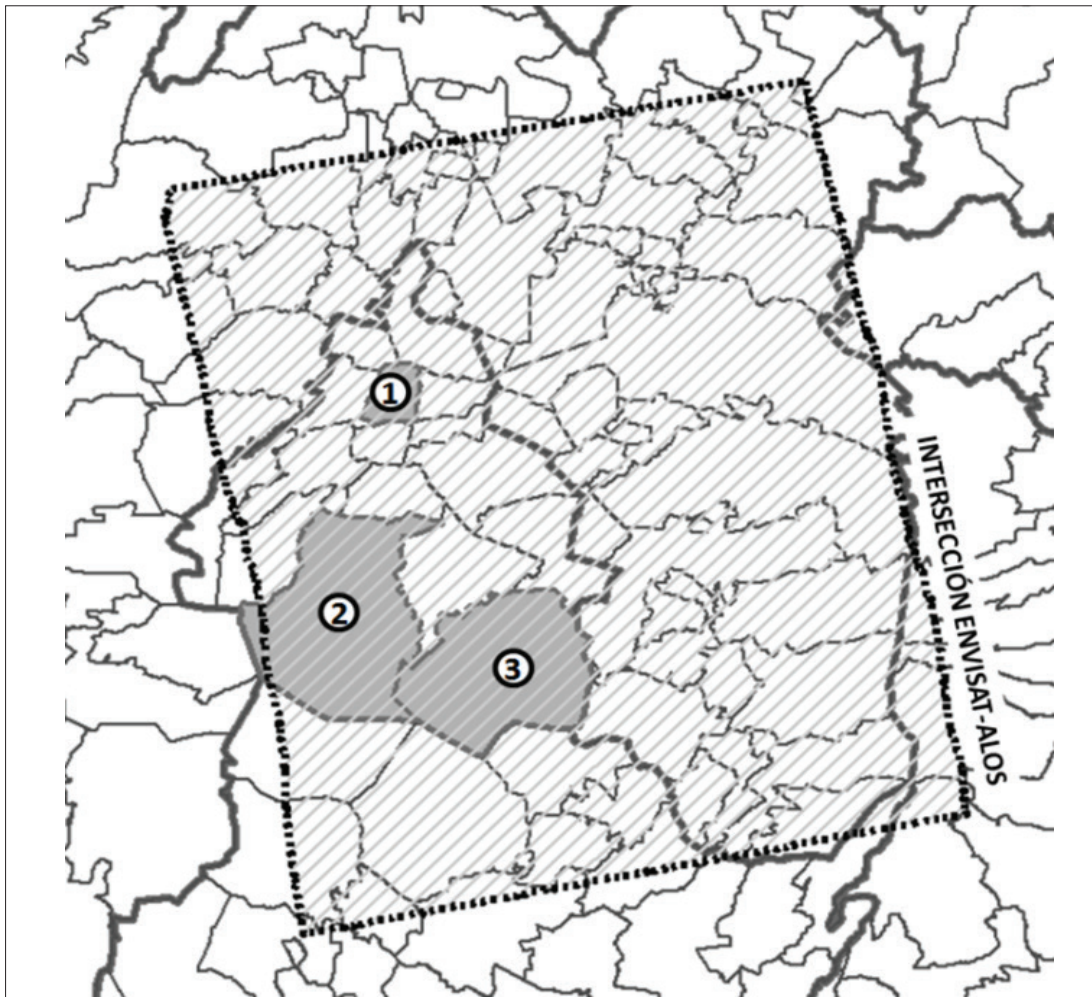
En este contexto, se propone como base de la solución científica a la geomática, una disciplina en la que convergen principalmente la geografía y las ciencias de la información en los ámbitos del conocimiento y la tecnología (Reyes, 2010). En relación con el primero de estos ámbitos, se busca un mayor dominio epistemológico sobre el crecimiento urbano como fenómeno social y territorial, en términos de conocimiento geoespacial; en relación con el segundo ámbito, se busca una aplicación específica de técnicas de Interferometría Radar para la caracterización de las áreas urbanas. Tanto lo epistemológico como lo tecnológico interactúan en tres categorías propias de la geomática (Billen, 2009): la primera, “la adquisición y el tratamiento de información”, que incluye el reprocesamiento y procesamiento de la información base; la segunda, “la modelación”, que comprende una abstracción y una generalización del crecimiento urbano como fenómeno social y territorial; y la tercera, “el razonamiento espacial”, materializado en la cartografía digital.

ÁREA DE ESTUDIO

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) es una denominación funcional que reciben un conjunto de entidades administrativas contiguas y ligadas entre sí en términos sociales, económicos y urbanos, a causa de la influencia dominante de la ciudad de México y su área metropolitana (Pradilla, Moreno, & Márquez, 2011). Según la Secretaría de Desarrollo Social (Sedesol), el Consejo Nacional de Población (Conapo) y el INEGI, a partir del año 2005 la ZMVM está conformada por las 16 delegaciones del Distrito Federal, 59 municipios conurbados del Estado de México y uno del Estado de Hidalgo (Sedesol, Conapo, & INEGI, 2013). Como se puede notar en la figura 1, la cobertura de los datos SAR abarca la mayor parte del área urbanizada. Se seleccionaron específicamente tres delegaciones representativas de un grado diferente del proceso de urbanización de la ZMVM: Delegación Cuauhtémoc, que se caracteriza por una alta densidad, una tasa de crecimiento a la baja y un crecimiento urbano ya consolidado; Delegación Tlalpan, con un grado

de urbanización mixto, que incorpora algunos asentamientos consolidados y otros no, en los que existen diferentes niveles de concentración y de dispersión de la población; y Delegación Milpa Alta, caracterizada por asentamientos rurales y periurbanos de edificaciones pequeñas con muy baja densidad, en constante crecimiento, sin consolidar y con una tasa de crecimiento en alza para una población que todavía no llega a la transición demográfica.

Figura 1. Zona de estudio.



Intersección entre las coberturas de las imágenes Envisat y Alos-Palsar en achurado y línea discontinua. Delegaciones: (1) Cuauhtémoc; (2) Tlalpan; (3) Milpa Alta. Fuente: elaboración propia.

DATOS

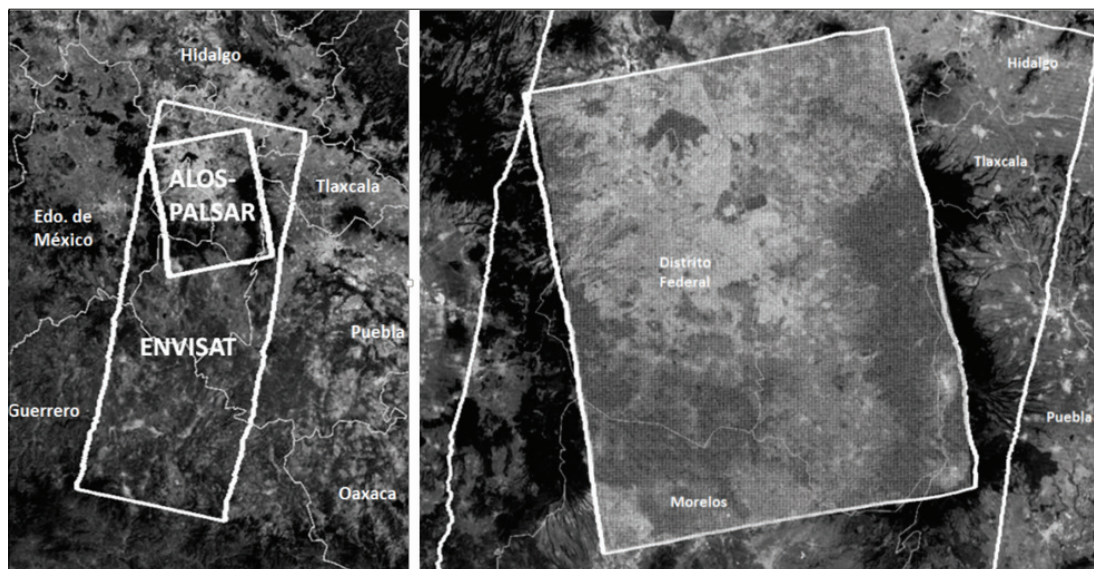
Este trabajo se basa en la comparación entre imágenes SAR de una y dos polarizaciones para evaluar su potencialidad en la generación de información de áreas urbanas. Para ello se cuenta con datos de los satélites Envisat y Alos. Todas las características relativas a los dos pares de imágenes utilizadas, así como su cobertura, se muestran en la tabla 1 y figura 2.

Tabla 1. Productos base: imágenes SAR.

	ENVISAT – ASAR	ALOS – PALSAR
Imagen 1	2008/sep/26	2008/ago/16
Imagen 2	2008/oct/31	2008/oct/01
Nivel de procesamiento	Raw data (Level 0)	Raw data (Level 0)
Banda – frecuencia	C - 5.331GHz	L - 1.270GHz
Longitud de onda	5.6cm	23.6cm
Modo	Advanced Synthetic Aperture Radar Image (ASAR_IM)	Fine Beam Double Polarisation (FBD)
Polarización*	VV	HH + HV
Resolución en SLC	19.84m en rango	16.33m en rango
	4.32m en azimut	3.16m en azimut
Trayectoria del sensor	Descendente	Ascendente
Base temporal	36 días	46 días
Base perpendicular	86.777m	540.766m

Fuente: elaboración propia.

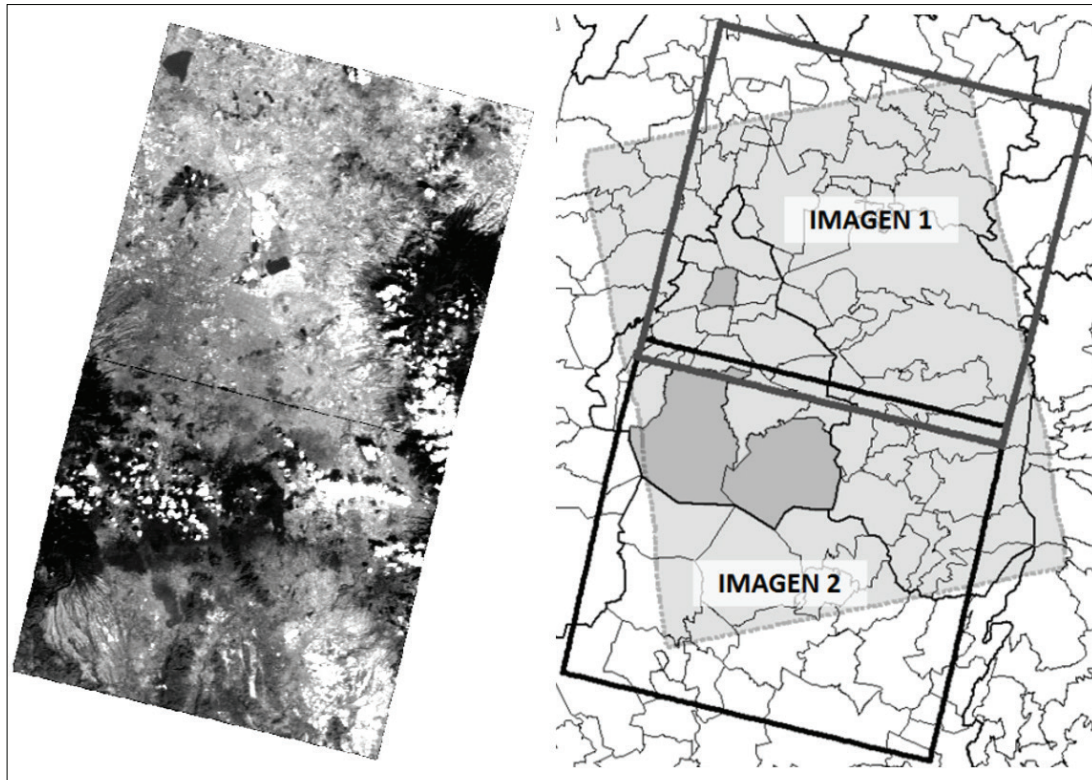
Figura 2. Cobertura geográfica de imágenes SAR.



Cobertura geográfica de los pares de imágenes SAR Envisat y Alos Palsar sobre una imagen óptica Landsat-7 (izq.). Detalle sobre la Zona Metropolitana del Valle de México (der.). Fuente: elaboración propia.

Las imágenes tomadas por sensores pasivos son la principal fuente de información para comparar y validar los resultados obtenidos con InSAR. En esta investigación se utilizan dos imágenes del satélite SPOT-5 con una cobertura geográfica similar a la de los datos de radar, tal como se puede ver en la figura 3. Ambas imágenes fueron tomadas el 30 de diciembre de 2008.

Figura 3. Imágenes ópticas SPOT-5.



Imágenes ópticas SPOT-5 (izq.) y su cobertura geográfica (der.) indicando en gris claro el área de los datos SAR y en gris oscuro las tres delegaciones a analizar detalladamente. Fuente: elaboración propia.

MARCO METODOLÓGICO

DEFINICIONES PRINCIPALES

Todo radar es por definición un sistema activo que emite y recibe pulsos electromagnéticos dentro del rango de las microondas. Estas ondas son de baja frecuencia y tienen longitudes de milímetros a decenas de centímetros (Lira, 2002). El Radar de Apertura Sintética, por su parte, es un tipo específico de sistema radar más conocido como SAR (acrónimo en inglés de *Synthetic Aperture Radar*), cuya mayor particularidad es que logra adquirir datos con una gran resolución espacial con una antena pequeña que emite y recibe pulsos varias veces sobre un mismo objetivo. Precisamente el nombre de “apertura sintética” se debe a que toda la energía retro dispersada no se recibe de

manera directa sino que se reconstruye a través de algoritmos haciendo una síntesis o enfoque de múltiples señales (Polidori, 1997).

La imagen de radar se forma a partir de cada eco o señal de retorno a la antena, los cuales se almacenan en una matriz bidimensional de números complejos que contienen información sobre la magnitud (potencia) y ciclo (fase) de la señal. Las características que determinan el tipo de respuesta del eco dependen de varios factores. En lo que respecta a la onda emitida y recibida hay que tener en cuenta la banda (frecuencia), la polarización¹, la dirección y la longitud de la onda; en cuanto al objetivo, la respuesta estará determinada por la geometría, la textura, el material y la constante dieléctrica y, en general, por cualquier otro tipo de parámetro físico, electromagnético, morfológico o estructural (Duffermon, 2006). Estas dos clases de factores están relacionadas con la reflexión de la señal de radar, la cual puede ser especular o dispersa. Es posible aprovechar todo ello para extraer información de los datos SAR a partir de la Interferometría Radar o InSAR (acrónimo en inglés de *Interferometric Synthetic Aperture Radar*), la cual constituye toda una rama dentro del procesamiento de imágenes SAR. Básicamente el objetivo de la InSAR es medir para una misma área geográfica las disimilitudes entre dos señales de radar, y más precisamente, las de la fase de la energía dispersada que retorna a la antena (Hanssen, 2002). Esta diferencia entre las dos señales corresponde a una fracción entre los ciclos que se expresa como una cifra en grados o en centímetros. Gracias al carácter cíclico de las señales de radar dicha diferencia corresponde, por lo tanto, a un valor en radianes dentro del rango de cero a 2π , o a un valor en centímetros de acuerdo con la longitud de onda. Por una parte, la fracción que hay entre las dos fases de las señales de radar sirve, expresada como distancia, para calcular la separación de un objetivo con respecto a la antena calculando el número de ciclos según la longitud de onda (Mott, 2007). Por otra parte, expresada en valor de grados sirve para caracterizar el objetivo según los mecanismos de retro dispersión de la señal, calculados por medio de las similitudes y diferencias entre fases (Oliver & Quegan, 2004).

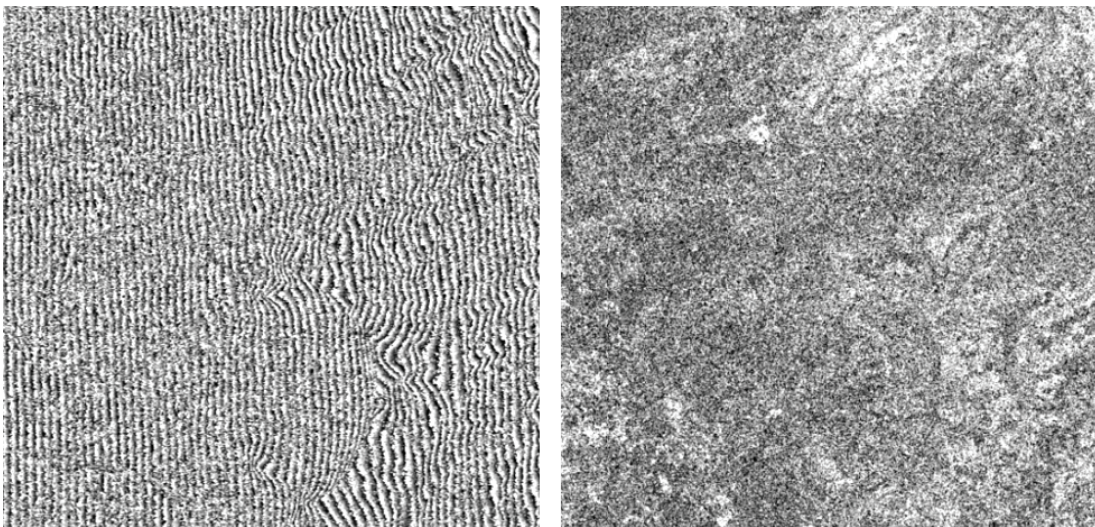
Como toda la InSAR se basa en la comparación de, al menos, dos señales de una misma área geográfica, es posible diferenciar tres métodos para adquirir el par de datos: el primero, denominado “de un paso y dos antenas”, consiste en una plataforma equipada con dos sensores separados entre sí; el segundo, denominado “de dos pasos y una antena” es un mismo sensor que pasa en dos momentos diferentes; y el tercero, denominado “de un paso y una antena”, se basa en la comparación entre señales con diferente polarización emitidas y recibidas por un único sensor.

El producto principal de la InSAR es el interferograma, una imagen generada a partir de la multi-

¹ La polarización de una onda de radar está definida por los planos de transmisión y recepción de la señal, pudiendo ser éstos el plano horizontal (H) o el vertical (V). En este sentido, HH significa que la señal es emitida y recibida en el plano horizontal, mientras que HV significa que la onda se emite en el plano horizontal, pero es recibida en el plano vertical. El número total de polarizaciones posibles para una onda de radar es de cuatro: HH, HV, VV, VH.

plicación pixel por pixel de los valores de la primera señal por el complejo conjugado de la segunda señal. Como se trata de valores complejos, el interferograma resultante calculado es una matriz bidimensional que tiene un módulo y una fase (figura 4). El módulo es el producto de la multiplicación cruzada entre las dos señales, pero se expresa de manera normalizada, dividiendo el valor de cada pixel sobre el valor máximo; la fase del interferograma, por su parte, está conformada por valores entre -180° a $+180^\circ$ producto de la operación entre las dos señales. En suma, el módulo normalizado corresponde a la coherencia, una medida estadística de correlación entre las dos señales; mientras que la fase del interferograma recoge las diferencias entre los dos ecos en ciclos de 2π (Polidori, 1997).

Figura 4. Fase y módulo de un interferograma sin filtrado (detalle).



En la fase del interferograma (izq.) cada “franja” o “anillo” equivale a una diferencia de fase de 2π entre las dos señales, en una escala de valores de -180° a $+180^\circ$. En el módulo del interferograma (der.) se observa en una escala de cero (negro) a 1 (blanco) el grado de correlación entre las dos señales. Fuente: elaboración propia a partir de dos imágenes SAR del sensor Alos-Palsar con polarización HV y base temporal de 46 días (interferometría de dos pasos y una antena)

TÉCNICAS INTERFEROMÉTRICAS

El uso de la InSAR para determinar la posición de un punto de la superficie terrestre con respecto a la distancia a la antena está ampliamente extendido para la generación de modelos digitales de terreno o DEM (*Digital Elevation Model*), y también para el cálculo de la deformación de la superficie terrestre debida a terremotos, subducción, erupciones volcánicas, entre otros fenómenos (Adragona & Nicolas, 2008). La literatura enfocada en este tipo de resultados es bastante extensa, y prácticamente abarca la gran mayoría de aplicaciones de la InSAR desde la década de 1960 (Hanssen, 2002). Otro uso, que Polidori (1997) denomina como uso temático de la InSAR, basado en los

mecanismos de retro dispersión de la señal para la caracterización del tipo de objeto o superficie iluminado, no tiene todavía una relevancia equiparable. Precisamente este trabajo busca identificar los aportes y las limitaciones de la InSAR para la clasificación temática de los objetos y la superficie terrestre, orientada a la caracterización de las áreas urbanas. Para ello, se han identificado tres tipos de técnicas específicas dentro de la InSAR, dirigidas a obtener una serie de productos aprovechando las herramientas y métodos propios del procesamiento interferométrico de las imágenes SAR.

Las primeras dos técnicas (A) y (B) se basan en el cálculo de la coherencia entre dos señales, también denominada como coeficiente de correlación compleja (Shirvany, 2012). La técnica (A) se enfoca en comparar dos imágenes de radar separadas por un intervalo de tiempo y una distancia orbital; mientras que la (B), por su parte, lo hace con dos señales de diferente polarización captadas sin intervalo temporal y con distancia orbital igual a cero. En su expresión matemática, ambas técnicas mencionadas se diferencian así por los componentes que determinan el valor obtenido de correlación normalizada entre las dos ondas de radar. De esta manera, el cálculo de la coherencia entre (A), un par de imágenes captadas con un intervalo de tiempo, y (B), dos polarizaciones captadas al mismo tiempo, está definido por sus componentes de la siguiente manera (Richards, 2009):

$$\text{Para (A)} \gamma = \gamma_{\text{líneas de base}} \gamma_{\text{pixel}} \gamma_{\text{ruido}}, \text{ Para (B)} \gamma = \gamma_{\text{polarización}} \gamma_{\text{pixel}} \gamma_{\text{ruido}}$$

Para ambas técnicas la ecuación matemática que permite medir el grado de correlación entre las dos señales es la misma:

$$\gamma = \frac{\sum S_1 S_2^*}{\sqrt{(\sum |S_1|^2)(\sum |S_2|^2)}}$$

Para (A), los términos S_1 y S_2 corresponden a dos señales de radar con misma polarización separadas por un intervalo de tiempo y una distancia orbital; para (B) los términos S_1 y S_2 corresponden a dos señales de radar con diferente polarización sin intervalo de tiempo y con la misma geometría. El símbolo * en la segunda señal (S_2^*) indica que la multiplicación y sumatoria de esta matriz bidimensional de números complejos se realiza sobre su conjugada compuesta.

En (A) los pixeles con valores cercanos a cero indican zonas cambiantes, generalmente objetos de orden natural; los pixeles con valores cercanos a 1 corresponden a objetos estructural y morfológicamente más estables, como suelos desnudos o infraestructura. En (B) los pixeles con valores que tienden a cero indican que la reflexión de la señal en las dos polarizaciones fue difusa; pixeles con

valores cercanos a 1 corresponden a objetos o coberturas donde el mecanismo de retro dispersión de las dos ondas fue de tipo especular en las dos polarizaciones.

La tercera técnica interferométrica (C) identificada con el fin de indagar el potencial de la InSAR para la caracterización de las áreas urbanas es el cálculo de la diferencia de fase ($\Delta\phi$) entre dos señales con distinta polarización. El objetivo de esta técnica está enfocado en determinar cuáles han sido los mecanismos de retro dispersión de las ondas emitidas y recibidas por el sensor en su interacción con un objetivo (Ducrot, Tupin, & Le Hegarat-Masclé, 2008). Dependiendo de las polarizaciones de las dos señales, este cálculo de diferencia de fase puede ser: por una parte, diferencia de fase entre polarizaciones copolares o *co-polar phase difference* (CPD), cuando la operación se hace entre las polarizaciones HH y VV; y por otra, diferencia de fase entre polarizaciones cruzadas o *cross-polar phase difference* (XPD), cuando la operación se hace entre una polarización HH o VV y una polarización HV o VH (CCRS/CCT, 2003). Todos los objetos o superficies naturales como pastizales, cultivos y bosques, no son identificables en el cálculo de la XPD, ya que su respuesta se distribuye uniformemente dentro de todo el rango de valores entre -180° y $+180^\circ$ (Shirvany, 2012). Esta carencia tiene una enorme potencialidad para las aplicaciones urbanas puesto que todo objeto o superficie que no sea antrópico, es visual y estadísticamente homogéneo en el cálculo de la XPD.

Tanto para la CPD como para la XPD, Van Zyl (1989) identificó una relación clara entre el valor de la diferencia de fase y el mecanismo de retro dispersión de las señales. Esto se traduce en tres mecanismos correspondientes con el siguiente valor en grados: 1. Retro dispersión especular de la señal con un número impar de reflexiones del haz de radar (valores de la $\Delta\phi$ que tienden a 0°); 2. Retro dispersión especular de la señal con un número par de reflexiones del haz de radar (valores que tienden a -180° o a $+180^\circ$); y 3. Retro dispersión difusa con un número múltiple e indefinido de reflexiones del haz de radar (valores uniformemente distribuidos entre -180° a $+180^\circ$). Esto permite discriminar entre objetivos donde la señal sigue un modelo de doble rebote, cuando la configuración de los planos del objeto es diédrica; o un modelo de rebotes impares, donde la configuración del objeto es triédrica o perpendicular a la trayectoria de la señal; o donde la señal tuvo una reflexión difusa. El cálculo de la diferencia de fase se hace con la siguiente ecuación:

$$\Delta\phi = \tan^{-1} \left[\frac{\left(\text{Im}(S_1 S_2^*) \right)}{\left(\text{Re}(S_1 S_2^*) \right)} \right]$$

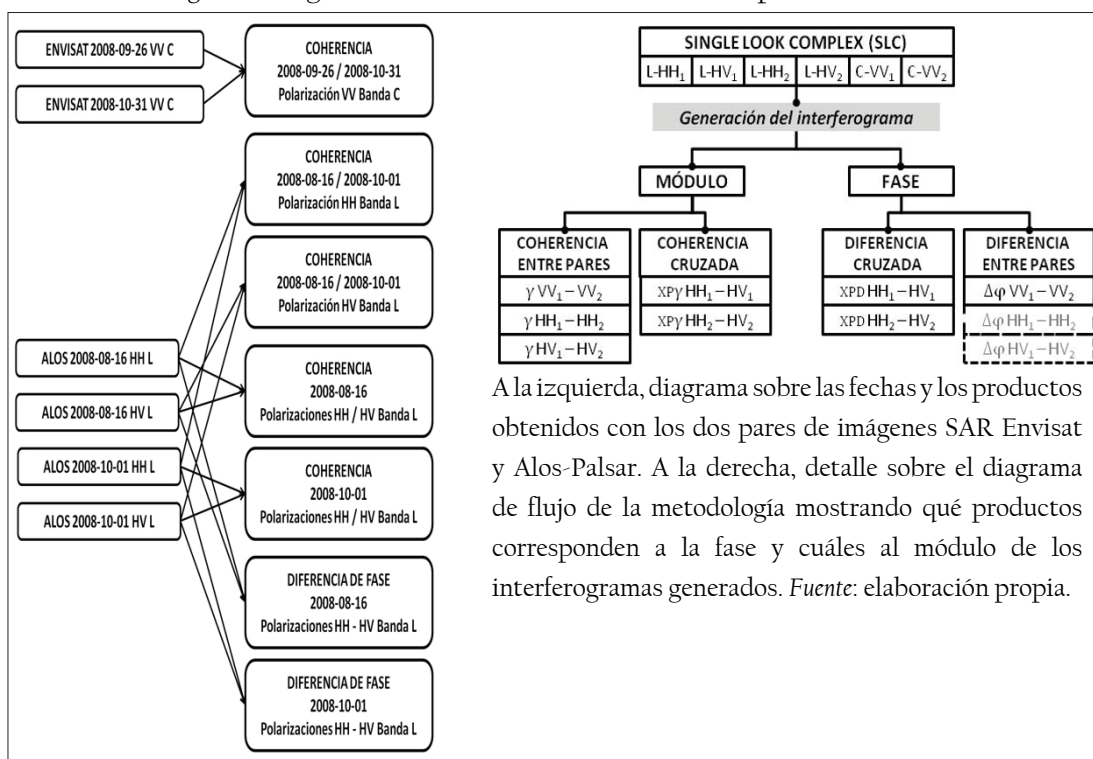
Donde los términos S_1 y S_2 corresponden a las dos señales con diferente polarización. Asimismo, igual que en el caso de la coherencia el símbolo * en la segunda señal indica que la multiplicación y sumatoria de esta matriz bidimensional de números complejos se realiza sobre su conjugada com-

puesta. En suma, las tres técnicas interferométricas en este trabajo son: a) Coherencia entre dos señales con misma polarización, intervalo de tiempo entre sí y una distancia orbital.; b) Coherencia entre dos señales con diferente polarización, sin intervalo de tiempo y con misma geometría; c) Diferencia de fase entre dos señales con diferente polarización, sin intervalo de tiempo y con misma geometría.

METODOLOGÍA PROPUESTA

El punto de partida es la obtención de los siete productos base señalados en las figuras 5 y 6.

Figura 5. Diagramas sobre la obtención de los siete productos base.

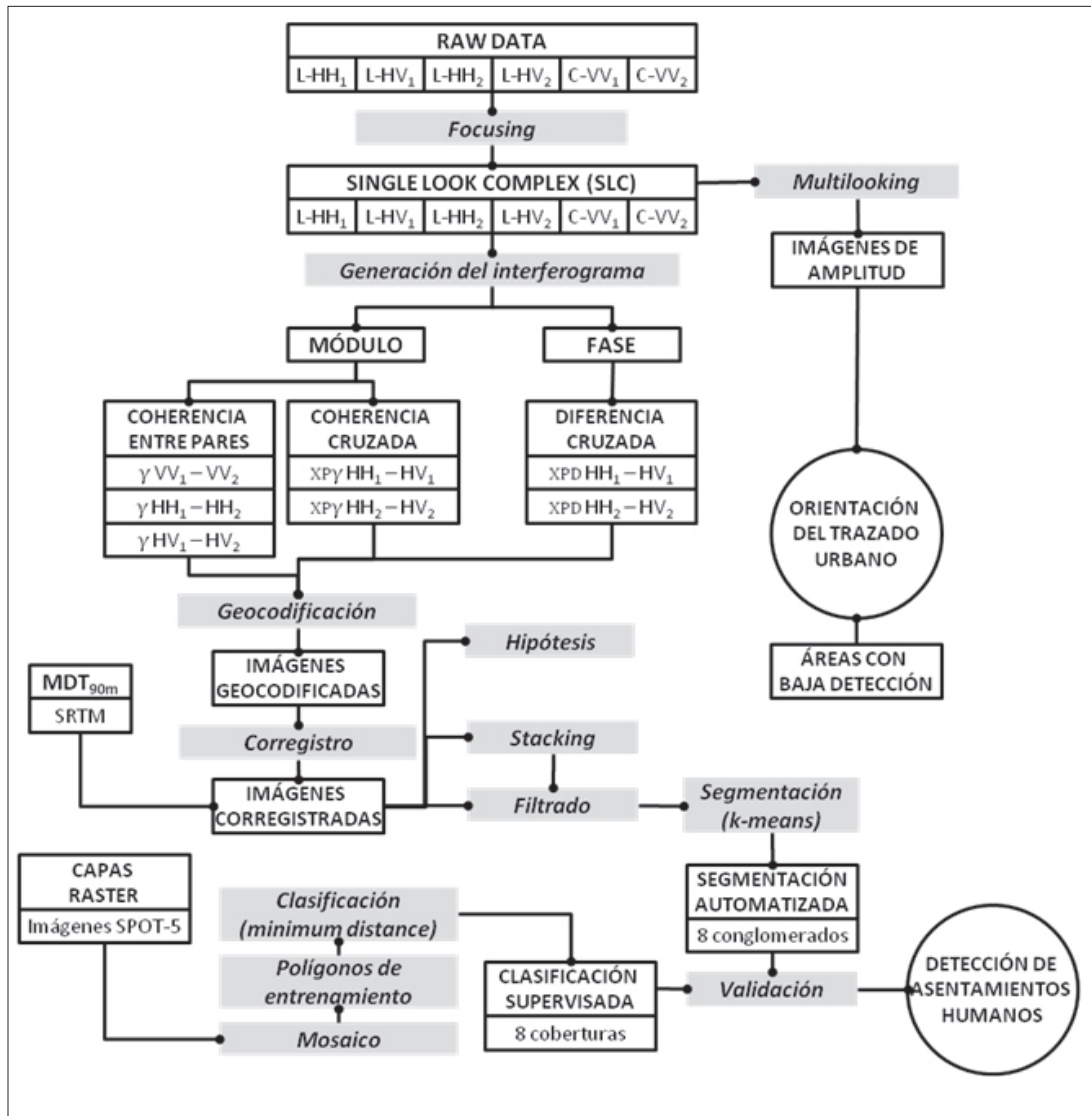


A la izquierda, diagrama sobre las fechas y los productos obtenidos con los dos pares de imágenes SAR Envisat y Alos-Palsar. A la derecha, detalle sobre el diagrama de flujo de la metodología mostrando qué productos corresponden a la fase y cuáles al módulo de los interferogramas generados. Fuente: elaboración propia.

La metodología propuesta en esta investigación está dividida en cuatro partes generales que van desde el pre-procesamiento de la señal de radar en estado crudo hasta la validación. La primera fase es de preprocesamiento de los dos pares de imágenes de radar en estado crudo y la generación de tres tipos de productos interferométricos. La segunda consiste en una aproximación cualitativa y cuantitativa de los productos interferométricos, buscando identificar en una primera instancia su pertinencia para la identificación y caracterización de áreas urbanas. La tercera parte de la metodología propuesta se centra en el procesamiento de la información auxiliar y su preparación para la validación de resultados. La cuarta parte es precisamente la validación de resultados, evaluando su potencialidad para la detección de asentamientos humanos, así como sus limitaciones

debidas a la orientación del trazado urbano.

Figura 6. Diagrama de flujo de metodología propuesta.



Fuente: elaboración propia.

ANÁLISIS Y RESULTADOS

DETECCIÓN DE ASENTAMIENTOS HUMANOS ENTRE CLASIFICACIONES MULTICLASE

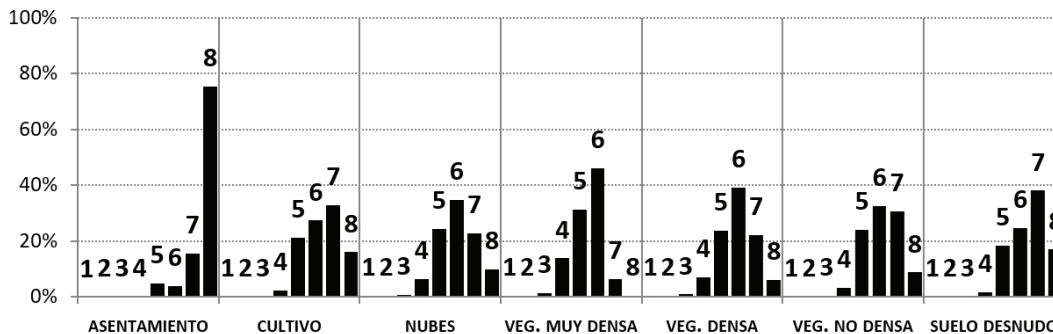
Con el objetivo de comparar los resultados a partir de InSAR con la clasificación supervisada de los datos SPOT se optó por una segmentación por K-medias. La razón fundamental es que el número de clases podía ser definido *a priori* y por esto no estaría basado en un rango variable de categorías, como en el algoritmo Isodata donde se selecciona un mínimo y un máximo de categorías.

Asimismo, ya que el filtrado de textura utilizado en los productos interferométricos es la media de los valores de coocurrencia, el algoritmo de K-medias resultaría más apropiado ya que se basa en el cálculo inicial del valor de la media de cada clase definida. En relación con la clasificación supervisada de los datos SPOT, hecha a partir de la distancia mínima, es importante mencionar también que el algoritmo K-medias es un procedimiento de agrupamiento que parte del mismo principio: luego de definir el valor promedio de cada clase o conglomerado, los píxeles se asignan a cada una de las medias estadísticas.

Con el fin de comparar los resultados entre clases dos nociones son relevantes: la cobertura, que es una clase determinada por valores de reflectividad de una imagen de sensor pasivo a partir de un algoritmo de clasificación supervisada, en este caso de distancia mínima; y el conglomerado, que es un agrupamiento de píxeles determinado de manera automatizada desde los datos SAR a partir de un algoritmo de segmentación de análisis de conglomerados (*clustering*). Debido al volumen de información y a la disponibilidad de las fuentes para validación, la comparación entre las dos clasificaciones se llevó a cabo sólo en las delegaciones Cuauhtémoc, Tlalpan y Milpa Alta. En ambas clasificaciones el área coincidente con respecto a las tres delegaciones, con un tamaño de píxel de 20m, es de 5,817,088 píxeles. Para este número de píxeles se evaluaron las coincidencias entre coberturas y conglomerados. Esta comparación se hizo a partir del número de píxeles de cada conglomerado contenidos en una cobertura, pero también en función del número de píxeles de cada cobertura contenidos en un conglomerado, tal como se muestra en las figuras 7 y 8.

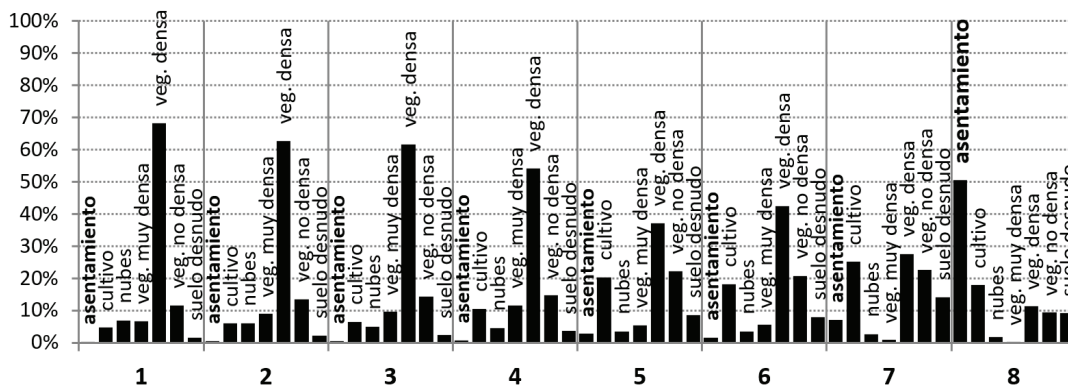
Como en ninguna de las tres delegaciones hubo píxeles clasificados dentro de la cobertura 'agua' el análisis entre las dos clasificaciones se centra en 7 coberturas y 8 conglomerados. Para el primer caso el número de coincidencias representa 75.43% de los píxeles de la cobertura, mientras que para el segundo 50.51%. Con estos resultados es posible afirmar que existe una buena correspondencia entre la cobertura de 'asentamientos humanos' y el conglomerado 8, pero también un error asociado a la sobreestimación de áreas urbanas en la segmentación. Es decir, el conglomerado 8 representa bastante bien las asignaciones hechas en la clasificación supervisada de la cobertura de 'asentamientos humanos', pero en éste hay también una coincidencia con las otras coberturas de poco menos del 50%, distribuida de manera relativamente uniforme. Sin embargo, en términos generales, para ambos porcentajes el producto es significativamente bueno, pues se está obteniendo un número elevado de coincidencias desde un procedimiento automatizado con respecto a una clasificación supervisada, que también tiene un error asociado. El resultado de ambas clasificaciones puede verse en la figura 9.

Figura 7. Porcentaje de píxeles de una cobertura contenidos en un conglomerado.



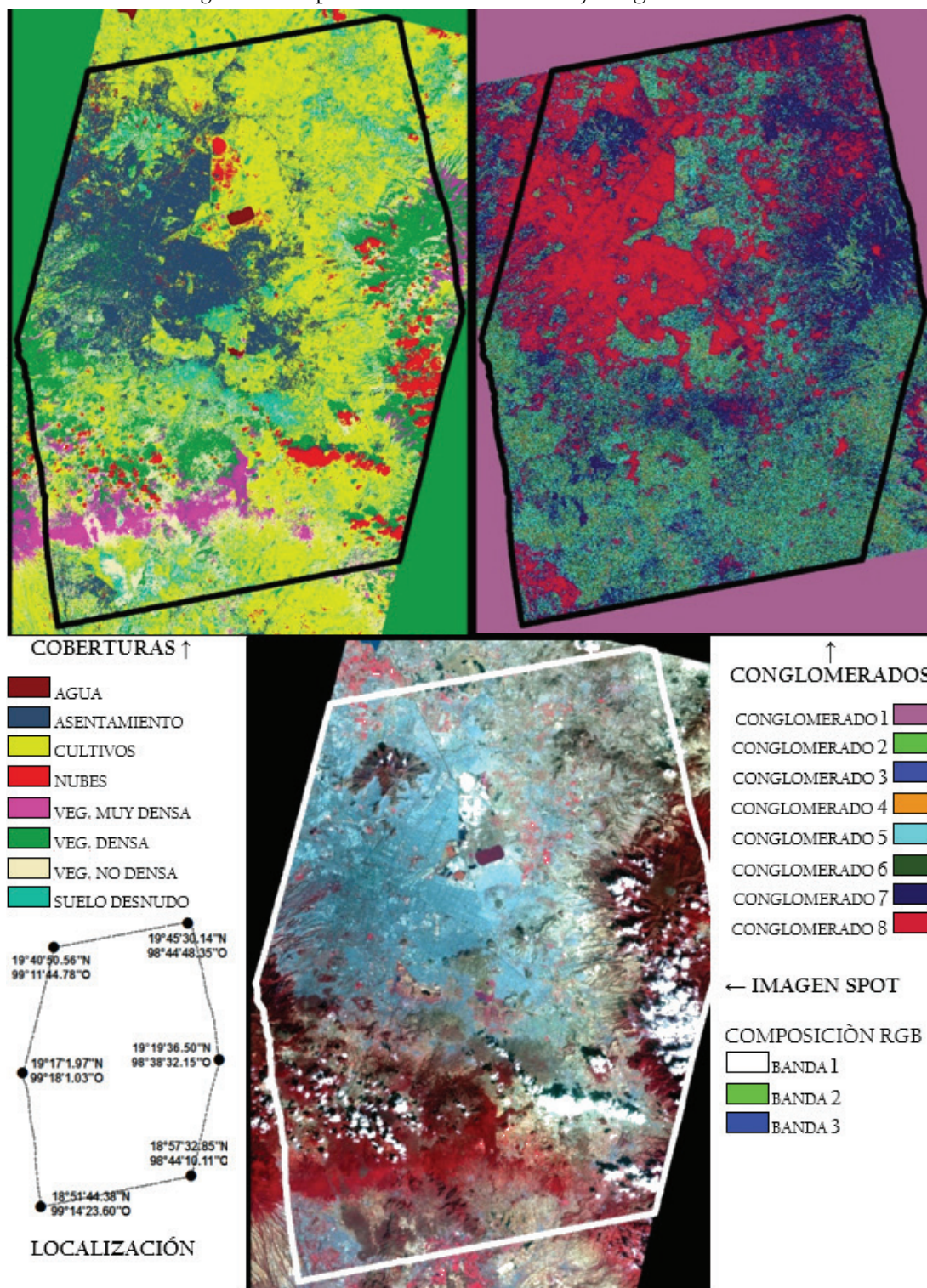
La sumatoria del valor de las barras en cada cobertura corresponde al 100% de píxeles. Los números cardinales identifican los ocho (8) conglomerados obtenidos por K-medias (1=clase 1, 2=clase 2,... 8=clase 8). Fuente: elaboración propia.

Figura 8. Porcentaje de píxeles de un conglomerado contenidos en una cobertura.



La sumatoria del valor de las barras en cada conglomerado corresponde al 100% de píxeles de ese conglomerado. En negrilla se resaltan los valores para la cobertura de asentamientos humanos. Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Comparación entre coberturas y conglomerados.

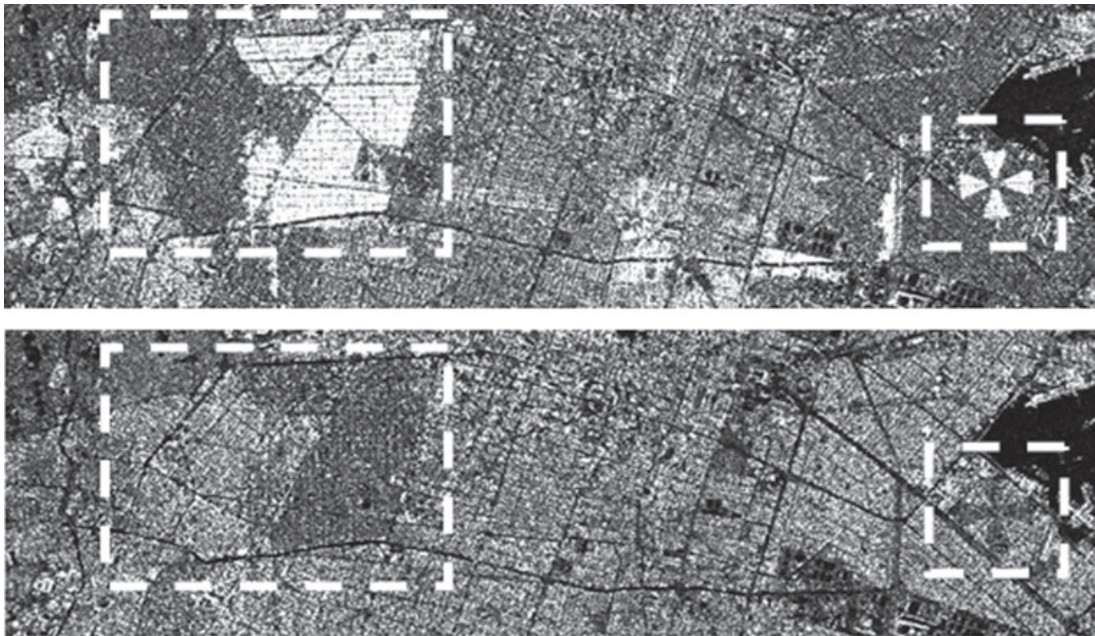


Escala 1: 1,000,000. Sistema de coordenadas geográficas para las tres imágenes: latitud-longitud WGS-84. Comparativo entre coberturas, conglomerados e imagen Óptica del área de estudio. Fuente: elaboración propia

INFLUENCIA DE LA ORIENTACIÓN DEL TRAZADO URBANO

La orientación de los objetos iluminados por el sensor puede tener un impacto considerable cuando se trabaja con polarizaciones cruzadas. Más específicamente, los problemas en la detección de objetos aparecen principalmente cuando presentan algún tipo de simetría o asimetría con respecto al azimut. La hipótesis, asumiendo que hay conflictos generados por la orientación del trazado urbano, es que la detección de las áreas urbanas se vuelve problemática debido a la variación de la respuesta radiométrica en función de la posición de los objetos con respecto al azimut para dos polarizaciones cruzadas. Como se verá más adelante, esto se plantea cuando la orientación del trazado urbano forma un ángulo de 45° con respecto a la trayectoria del sensor (asimetría máxima), o cuando el ángulo es de 0° (simetría absoluta o relativa). Para demostrar que en los casos señalados de áreas urbanas el problema de la detección viene determinado por la orientación y no por la cobertura, la humedad o el tipo de objeto, a continuación se presentan dos ejemplos (figura 10) dentro de las áreas señaladas que son excelentes indicadores para mostrar la variación radiométrica producida por la orientación.

Figura 10. Ejemplos de áreas urbanas homogéneas con problemas causados por la orientación.



Área central de la Zona Metropolitana del Valle de México. Imagen de intensidad polarización HH Alos-Palsar (sup.); imagen de intensidad polarización HV Alos-Palsar (inf.). Ambas imágenes sin geocodificar. Fuente: elaboración propia.

El primero de estos ejemplos es la colonia Federal, al sur del Aeropuerto Internacional Benito Juárez. Esta colonia corresponde a un desarrollo urbano para trabajadores del Estado durante el gobierno de Plutarco Elías Calles (1924-1930). Como asentamiento planificado, la estructura

de esta colonia es de calles rectas, edificaciones con el mismo patrón arquitectónico, y con una regularidad marcada por la forma radial de su estructura vial. Corresponde por lo tanto a un conjunto de objetos homogéneos desde la perspectiva del radar, en el cual se puede demostrar que la orientación juega un papel importante. Como se puede observar en la figura 11 la orientación de las calles que están aproximadamente a $0^\circ/90^\circ$ con respecto a la trayectoria del sensor genera una respuesta diferente en la polarización HH, con respecto a la polarización HV. Esta variación produce una disminución significativa en el cálculo de la correlación entre polarizaciones cruzadas, y por ello se produce una respuesta menor en determinadas zonas de los asentamientos, en este caso, en la colonia Federal.

Figura 11. Detalle de la retro dispersión de la señal de radar en la colonia Federal.

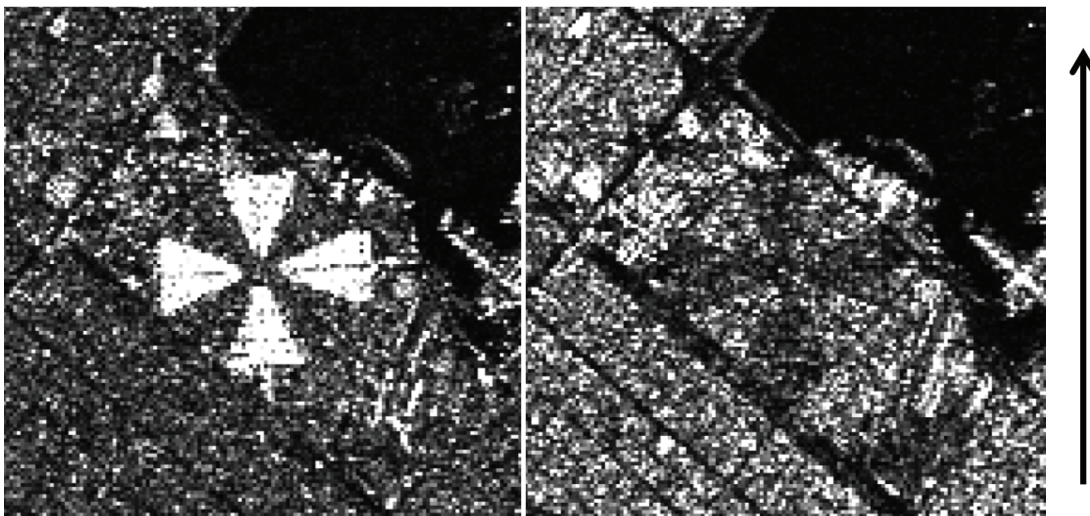


Imagen de intensidad polarización HH Alos-Palsar (izq.); imagen de intensidad polarización HV Alos-Palsar (der.). Ambas imágenes sin geocodificar. La flecha a la derecha indica la trayectoria del sensor.
Fuente: elaboración propia.

Un ejemplo similar es la colonia Condesa, también en el área central de la Zona Metropolitana del Valle de México. Esta área, que agrupa las actuales colonias Condesa, Hipódromo Condesa e Hipódromo, fue un desarrollo del porfiriato llevado a cabo durante los últimos años del siglo XIX y los primeros del siglo XX. Si bien muchas edificaciones históricas han sido demolidas, la estructura de calles ortogonales aún se conserva y es precisamente ello lo que tiene relevancia en el estudio de la orientación urbana para analizar la respuesta del radar. Como puede verse en la figura 12, al igual que en la colonia Federal la estructura de calles orientada a $0^\circ/90^\circ$ con respecto a la trayectoria del sensor genera una respuesta mayor en la polarización HH que en la polarización HV.

Figura 12. Detalle de la retro dispersión de la señal de radar en la colonia Condesa.

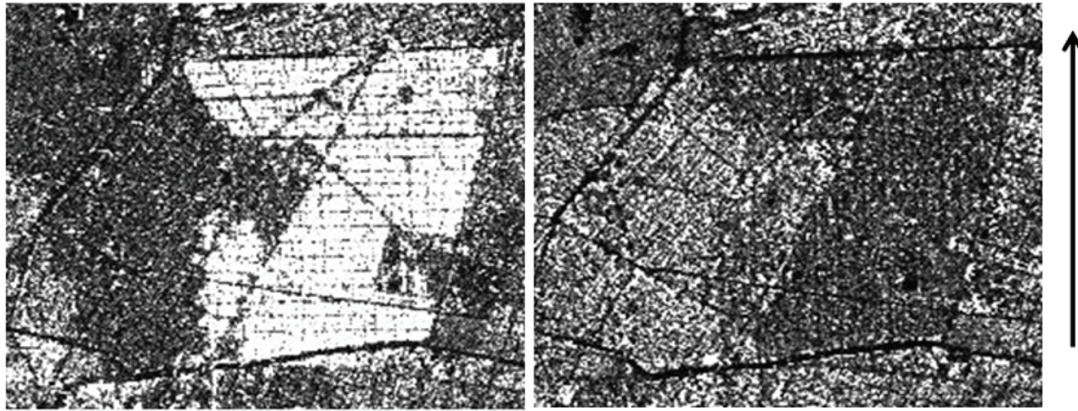
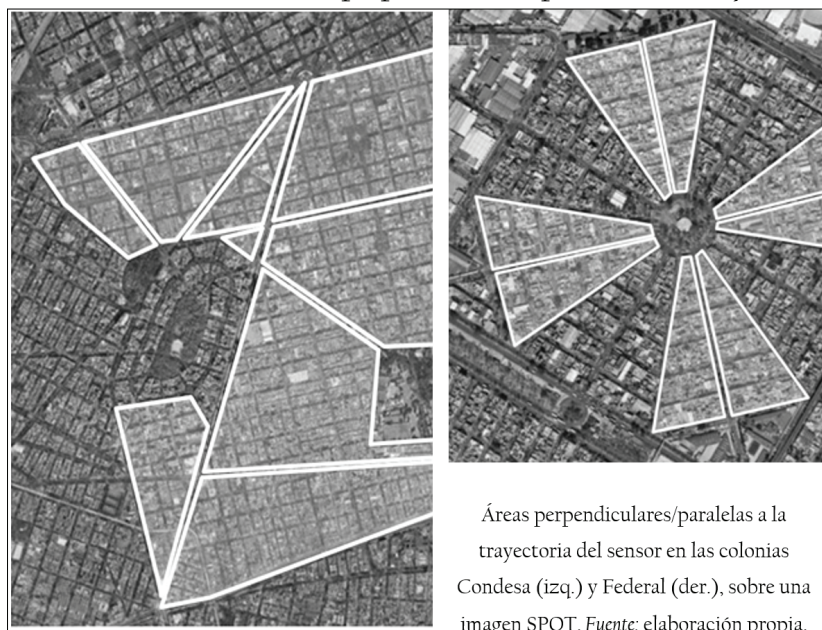


Imagen de intensidad polarización HH Alos-Palsar (izq.); imagen de intensidad polarización HV Alos-Palsar (der.). Ambas imágenes sin geocodificar. La flecha a la derecha indica la trayectoria del sensor.
Fuente: elaboración propia

En la figura 13 se pueden observar para los dos ejemplos las áreas de la estructura urbana orientadas a $0^\circ/90^\circ$ con respecto a la trayectoria del sensor, en las que hay una disminución en la correlación entre los canales cruzados. En suma, con base en el análisis del par de polarizaciones HH y HV de Alos-Palsar puede decirse que la baja detección de ciertas áreas de los asentamientos humanos se debe a la baja correlación entre canales que afecta los cálculos de coherencia y de diferencia de fase entre polarizaciones cruzadas, a causa de las diferencias en la intensidad de la señal en la polarización HH, en la cual los volúmenes orientados a 0° o 90° producen una respuesta mayor de la retro dispersión de la señal.

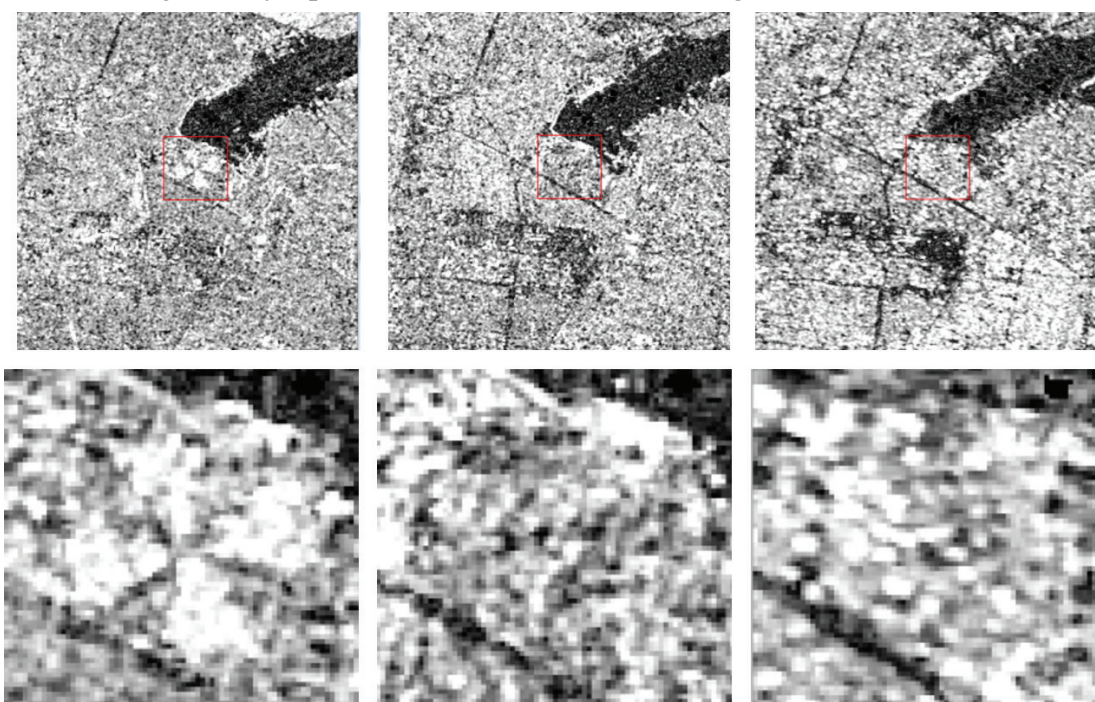
Figura 13. Áreas de la estructura urbana perpendiculares/paralelas a la trayectoria del sensor.



Áreas perpendiculares/paralelas a la trayectoria del sensor en las colonias Condesa (izq.) y Federal (der.), sobre una imagen SPOT. Fuente: elaboración propia.

Un comparativo entre los tres tipos de coherencia interferométrica, visible en la figura 14 permite observar igualmente la consistencia de la respuesta de dichos objetos en la polarización HH, a diferencia de las polarizaciones HV y VV. Este tipo de problemas hace parte de las limitaciones del uso de la InSAR para el monitoreo urbano. Como hipótesis alternativa puede plantearse que, observando la respuesta de las polarizaciones VV y HV, la polarización VH tendría un mejor potencial para solventar estas dificultades debido a su menor interacción con el suelo; asimismo la longitud de onda del sensor podría ser determinante para que la orientación sea o no relevante para la detección de asentamientos humanos. Las posibilidades para demostrar ambos planteamientos están, sin embargo, supeditadas a la disponibilidad de más información y nuevos análisis.

Figura 14. Ejemplo de la colonia Federal en tres imágenes de coherencia.



Imágenes de coherencia geocodificadas entre pares HH-HH (izq.); pares HV-HV (centro); pares VV-VV (der.). Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Dentro del estudio de las áreas urbanas a partir de InSAR siempre han destacado los trabajos que hacen uso sólo de la coherencia para la identificación de las zonas construidas. En los casos en que se busca aprovechar la información derivada de radar en más de una polarización, casi todos los estudios se centran en las cuatro polarizaciones completas. Este trabajo, sin embargo, pretendió ir más allá explorando la potencialidad y las limitaciones de la InSAR incluyendo y analizando no sólo la coherencia interferométrica, sino también las operaciones entre dos polarizaciones cruzadas. En este sentido, y ante la información existente, se buscó sacar el máximo provecho a los

datos disponibles de los sensores Envisat y Alos-Palsar desarrollando una metodología sencilla, que abarca desde las fases de pre procesamiento de las señales en estado crudo hasta su análisis y validación cuantitativa y cualitativa en las aplicaciones sobre la ciudad. En este contexto, el punto de partida fue evaluar las potencialidades y limitaciones de la InSAR, comparando y complementando la información derivada de imágenes de una y dos polarizaciones obtenidas de dos sensores diferentes. Con la metodología propuesta se quiso, ante todo, hacer frente a los problemas conceptuales más importantes que aquejan la falta de información de las áreas urbanas en México a partir de un caso de estudio. Para ello, en primer término, se propuso una secuencia de trabajo totalmente replicable a cualquier serie de datos similares, cuyos resultados puedan ser al mismo tiempo repetidos y comparados en uno o varios contextos geográficos de manera objetiva. En segundo término, esta investigación procuró evaluar los posibles aportes de la InSAR al ámbito de la generación de información geográfica de las ciudades, el cual es dominado por métodos más tradicionales y costosos a los que la InSAR puede ser complementaria. De esta manera, en cuanto a la secuencia de procesamiento y análisis establecida, esta investigación intentó proponer un esquema completo de trabajo que permita lidiar con la predominancia de la subjetividad en la generación de la información cartográfica, a partir de una caracterización automatizada de las coberturas, y al mismo tiempo, de proponer herramientas y técnicas consistentes permitiendo así un mayor conocimiento y dominio del crecimiento urbano. Los resultados obtenidos demuestran una enorme potencialidad para los datos derivados de InSAR con imágenes de una y dos polarizaciones, puesto que fue posible lograr una buena caracterización de diversas áreas construidas con distintos grados de urbanización dentro de la Zona Metropolitana del Valle de México, en comparación con una clasificación supervisada. Estos resultados son valiosos igualmente porque demuestran qué aspectos dentro del procesamiento propuesto pueden considerarse como limitaciones de la InSAR, especialmente en lo que se refiere a la orientación del trazado urbano. En todo caso, una posibilidad sigue abierta en función de los objetivos de esta investigación: se trata de la incorporación de otras polarizaciones donde predomine el plano vertical, como en la VV y la VH, cuya alta correlación con la polarización HV probablemente mejorará aún más los resultados de la estimación, y asimismo disminuirá los errores asociados a la orientación.

REFERENCIAS

- Adragna, F., & Nicolas, J. (2008). Interferometry. En H. Maitre (Ed.), *Processing of Synthetic Aperture Radar Images* (pp. 279-300). Londres: Wiley.
- Aguilar, A., & Escamilla, I. (2011). *Periurbanización y sustentabilidad en grandes ciudades*. México: UNAM.
- Archer, D. (1999). *Monitoring rapid urbanisation with imaging radars. Case study: west Africa*. Londres: Natural Resources Institute, University of Greenwich.

- Ban, Y., & Niu, X. (2010). Multitemporal Radarsat-2 polarimetric SAR data for urban land-cover mapping. En W. Wagner B. Székely (Eds.), *ISPRS TC VII Symposium – 100 Years ISPRS, XXXVIII (part 7A)*, 175-180.
- Billen, R. (2009). Les relations spatiales entre Géomatique et Géographie. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, (52), 45-47.
- Castells, M. (2006). *Problemas de investigación en sociología urbana*. México: Siglo XXI.
- CCRS/CCT (2003). Advanced Radar Polarimetry Tutorial. Recuperado de http://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/files/pdf/resource/tutor/polarim/pdf/polarim_e.pdf
- Commission of the European Communities (1995). *CORINE Land Cover*. Recuperado de <http://www.eea.europa.eu/publications/CORO-landcover>
- Couturier, S., Ricárdez, M., Osorno, J., & López, R. (2011). Morpho-spatial extraction of urban nuclei in diffusely urbanized metropolitan areas. *Landscape and Urban Planning*, (101), 338-348.
- Dell'Acqua, F., & Gamba, P. (2003). Texture-based characterization of urban environments on satellite SAR images. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 41 (1), 153-159.
- Ducrot, D., Tupin, F., & Le Hegarat-Masclé, S. (2008). Classification of SAR Images. En H. Maître (Ed.), *Processing of Synthetic Aperture Radar Images* (pp. 175-206). Londres: Wiley.
- Duffermon, A. (2006). *Cartographie de l'occupation du sol de Montréal par analyse de texture à partir d'images Radarsat-1* (Tesis de Maestría). UQAM, Montreal.
- Elridge, H. (1942). The Process of Urbanization. *Social Forces*, 20 (3), 311-316.
- García, F. (2010). La planeación del desarrollo regional en México (1900-2006). *Investigaciones Geográficas*, (71), 102-121.
- Garza, G. (1985). *El proceso de industrialización en la ciudad de México*. México: El Colegio de México.
- Hanssen, R. (2002). *Radar Interferometry. Data interpretation and error analysis*. New York: Kluwer Academic Publishers.
- INEGI. (s/f). *Manual de Normas para la Actualización de la Cartografía de Localidades Via Sistema de Posicionamiento Global (GPS)*. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/urbana/default.asp>
- Kipkemboi, B. (2012). *Detection of build-up areas in SAR and ASTER images using conditional random fields*. Enschede: University of Twente.
- Lefebvre, H. (1975). *De lo rural a lo urbano*. Madrid: Península.
- Lira, J. (2002). *Sistema radar de imágenes*. México: Monografías del Instituto de Geofísica / UNAM.
- Mott, H. (2007). *Remote Sensing with polarimetric Radar*. New Jersey: IEEE press.
- Naciones Unidas (2008). *Proceedings of the Expert Group Meeting on Population Distribution, Urbanization, Internal Migration and Development*. Recuperado de http://www.un.org/esa/population/meetings/EGM_PopDist/EGM_PopDist_Report.pdf
- Nolè, G., Lanorte, A., Murgante, B., & Lasaponara, R. (2012). Space Monitoring of urban sprawl. *EGU General Assembly*, 14, Viena.
- Olawole, M., Msimanga, L., Adegboyega, S., & Adesina, F. (2011). Monitoring and assessing urban encroachment into agricultural land. *Ife Journal of Science*, 13 (1), 149-160.
- Oliver, C., & Quegan, S. (2004). *Understanding Synthetic Aperture Radar Images*. Raleigh: SciTech Publishing.

- Palacio-Prieto, J., Sánchez, M., & Casado, J. (2004). *Indicadores para la caracterización y ordenamiento del territorio*. Mexico: Semarnat-UNAM-Sedesol.
- Polidori, L. (1997). *Cartographie Radar*. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers.
- Pradilla, E., Moreno, F., & Márquez, L. (2011). Cambios económicos y morfológicos, y conflictos sociales en la Zona Metropolitana del Valle de México (1982-2010). *Colloque Métropoles des Amériques: inégalités, conflits et gouvernance*, Montreal.
- Reyes, C. (2010). *Nuevas soluciones en Geomática: el caso de la Cartografía Cibernética*. Recuperado de <http://seia.guanajuato.gob.mx/panel/document/phpver.php?Id=1180>
- Reyes, C., & Parás, M. (diciembre de 2012). Geocybernetics: A pathway from empiricism to cognitive frameworks. *GEOcibernética: i+g+s*, 1 (1).
- Richards, J. (2009). *Remote Sensing with imaging radar*. Berlín: Springer.
- Santos, T., Freire, S., & Tenedório, J. (2011). *The GeoSat project: using remote sensing to keep pace with urban dynamics*. Recuperado de Earthzine: <http://www.earthzine.org/2011/11/09/the-geosat-project-using-remote-sensing-to-keep-pace-with-urban-dynamics/>
- Schnore, L. (1964). Urbanization and economic development: the demographic contribution. *American Journal of Economics and Sociology*, 23 (1), 37-48.
- Sedesol, Conapo, & INEGI. (2013). *Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2005*. México: Sedesol - Conapo - INEGI.
- Shirvany, R. (2012). *Estimation of the degree of polarisation in polarimetric SAR imagery: principles & applications* (Tesis de Doctorado). Institut National Polytechnique de Toulouse - University of Toulouse, Toulouse.
- Soergel, U. (2010). Review of radar remote sensing on urban areas. En U. Soergel (Ed.), *Radar remote sensing of urban areas* (pp. 1-48). New York: Springer.
- Taubenböck, H., & Esch, T. (2011). *Remote Sensing – An Effective Data Source for Urban Monitoring*. Recuperado de <http://www.earthzine.org/2011/07/20/remote-sensing-%E2%80%93-an-effective-data-source-for-urban-monitoring/>
- Taubenböck, H., Wegmann, M., Berger, C., & Breunig, M. (2008). Spatiotemporal analysis of indian megacities. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII, 75-82. Beijing.
- Van Zyl, J. (1989). Unsupervised classification of scattering behavior using radar polarimetry data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 27 (1), 36-45.
- Vu, T., Yamazaki, F., & Matsuoka, M. (2009). Multi-scale solution for building extraction from LiDAR. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, (11), 281-289.
- Wirth, L. (2005). El urbanismo como modo de vida. *Revista Bifurcaciones*, (2). Recuperado de <http://www.bifurcaciones.cl/002/reserva.htm>
- Worldwatch Institute (2012). *Rapidly Urbanizing Populations Face Unique Challenges*. Recuperado de <http://www.worldwatch.org/rapidly-urbanizing-populations-face-unique-challenges>.
- Yu, J., Hay-Man, A., Jung, S., & Ge, L. (2008). Urban monitoring using persistent scatterer InSAR and photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, 257-262. Beijing

IMPORTANCIA DEL MONITOREO EN 3D PARA LA GESTIÓN URBANA EFICIENTE: UN CASO DE ESTUDIO QUE ANALIZA CONDICIONES TOPOGRÁFICAS PREVIAS A LA URBANIZACIÓN

Fabiola D. Yépez Rincón*, Diego Fabián Lozano García** y Carlos Aguilar Treviño***

INTRODUCCIÓN

La velocidad con la que cambia la cobertura y uso de suelo en la ciudad generalmente no permite registrar los cambios, limitando el mapeo y análisis de éstos (Carleer & Wolff, 2006). Los sensores remotos permiten evaluar estas conversiones urbanas de uso de suelo, desde cambios de tipo agrícola a no-agrícola, pérdida de cuerpos de agua, pérdida de área forestal, desarrollo de las rutas de transporte y líneas de drenaje, cambios en la calidad ambiental urbana, entre otros análisis que sirven a los planeadores urbanos y tomadores de decisión alrededor del mundo (Tiwari, 2003).

Existe una gran variedad de sistemas de teledetección (Lillesand et al., 2008) y cientos de usos y aplicaciones para cada sensor (Schott, 2007 y Schowengerdt, 2006) o para la sinergia de sensores (Dubayah, 2000) entre los que se encuentran los que se utilizan para el ámbito urbano.

Las características de los sensores varían tanto en resolución espacial, resolución espectral, resolución temporal, entre otras características que los hacen únicos. Algunos sensores son usados más comúnmente que otros, aunque para estudios urbanos las imágenes multiespectrales de alta resolución y datos LIDAR (*Light detection and ranging*) se encuentran entre los más eficientes para la generación de información altimétrica (Baltsavias, 1999).

* Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, fabiola.yepetz@gmail.com

** Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, LabSIG, dflozano@itesm.mx

*** Teebcon Servicios, Ingenierías y Proyectos, SA de CV, teebcon@gmail.com

La oportunidad de conocer los cambios topográficos del área urbana, depende en gran medida de las capacidades del sensor con los que se obtienen los datos. No todas las tecnologías tienen las mismas ventajas con respecto a la generación de información 3D o los Modelos Digitales de Elevación (MDE), haciendo necesario evaluar el error de precisión, calidad morfológica, tiempo de producción y costos, entre otros factores. La tecnología LIDAR genera información en 3D y resuelve los problemas de resolución de datos (Benhamu & Doytsher, 2003), además con un proceso de filtrado clasifica el uso del suelo (Dubayah, 2000) con precisiones similares a las obtenidas con imágenes ópticas de alta resolución.

El objetivo del presente trabajo es mostrar la utilidad de las bases de datos geográficas con información en 3D de la ciudad, utilizando datos LIDAR aéreo del 2010 y generando un análisis topográfico en un caso de estudio para auxiliar a la gestión urbana eficiente del Área Metropolitana de Monterrey (AMM).

PROBLEMÁTICAS DEL CRECIMIENTO

Las ciudades crecieron rápidamente durante el siglo pasado (Alberti, 2005), su desarrollo acelerado se observa en la mayoría de las regiones y países del mundo (Lowe, 1991 y Moll, 1989) y muestra una relación directa con una serie de problemáticas y consecuencias negativas en la salud pública, la economía local y regional (Stren, 1995), así como en la sociedad y el medio ambiente (Moll & Petit, 1994).

Organismos internacionales como Naciones Unidas y el Banco Mundial proyectan que, en menos de 30 años, más del 75% de la población del Mundo residirá en áreas urbanas (World Bank, 1995 y UNICEF, 2012). Las tasas de urbanización de algunos países son alarmantes, por ejemplo, países africanos como Burkina Faso tienen una tasa de crecimiento de 6.8% anual o Uganda con 5.75% (UNCHS, 1996 y CIA, 2014); mientras que en América Latina se mantienen tasas de 3.43% en Guatemala, 1.7% en Venezuela, 1.54% en Belice y 1.49% en México (World Bank, 2014).

En México, al menos el 70% de la población (108 millones de habitantes) radica en zonas urbanas (INEGI, 2007). Al crecer la población, también aumenta la demanda de vivienda, es por ello que las políticas de vivienda tomaron especial importancia en este país.

De acuerdo con la Comisión Nacional de Vivienda (Conavi, 2010) en el 2010, el crecimiento urbano presentó las siguientes características:

1. Crecimiento desordenado, disperso y lejano a las ciudades.
2. Ubicación alejada de los desarrollos, a pesar de que las ciudades contaban con terrenos vacantes.
3. Subutilización de infraestructura, equipamiento y servicios en la ciudad interior y de la

cual se carece de nuevos desarrollos por su alto costo.

4. Asentamientos irregulares y generación de comercio informal a su alrededor.
5. Aumento en el deterioro social y largos recorridos de movilidad que causaron el abandono de viviendas, minusvalía y por consiguiente, cartera vencida.

ETAPAS DE LA PLANEACIÓN URBANA

Sánchez y Bonilla (2007) en su libro “Urbanización, cambios globales en el ambiente y desarrollo sustentable en América Latina” indican, que desde los años sesenta ya se conocía la problemática urbana. La vieja escuela del urbanismo creó avances para entender las dimensiones social, económica y política de las áreas urbanas, mientras que para los ochenta se incursionó en la temática ambiental y en los noventa la acentuación internacional volcó el enfoque hacia el desarrollo sustentable (García, Arzaluz, & Fitch, 2011; Gaza & Rodríguez, 1998). Es decir, a pesar de que los estudios urbanos tienen más de dos décadas de experiencia integral, poco se ha avanzado sobre el papel de los servicios ecológicos para la vida y la función urbana.

Las áreas urbanas afrontan muchos problemas ambientales. Esto sucede porque la urbanización provoca una serie de afectaciones al entorno, tales como alteración en la superficie de suelo impermeable que a su vez afecta los procesos geomorfológicos e hidrológicos, cambiando los flujos de corrientes, nutrientes y sedimentos (Leopold, 1968; Arnold & Gibbons, 1996); interrumpe, modifica o simplifica sistemas, y deteriora el ciclo hidrológico, microclima, la calidad del aire, suelo y agua (Alberti, 2005).

Para evitar éstas consecuencias un requerimiento primordial es la cuantificación de la potencialidad de los recursos. Los ordenamientos territoriales son el instrumento de la política ambiental que promueven el respeto a éste grado de disponibilidad de recursos (Sánchez, Casado, & Bocco, 2013). En México, los ordenamientos territoriales se encuentran amparados en el Programa Nacional de Desarrollo Urbano y Ordenación Territorial, se basan en la regulación o inducción del uso del suelo y de las actividades productivas con el fin de lograr la preservación y aprovechamiento del entorno.

Los ordenamientos territoriales son respaldados por bases de datos duras y su eficiencia en la gestión urbana parte de la estructuración del Sistema de Información Georreferenciada (SIG), el cual se alimenta con bases de datos geográficas, con datos multitemporales y además puede evolucionar y adaptarse de acuerdo a las necesidades cambiantes de las ciudades en crecimiento. Al respecto, Patkar (2003) indica los siguientes requisitos:

- Generación de un marco espacial en el ambiente SIG para planes de perspectivas y de desarrollo.

- Preparación de mapas temáticos de datos de satélite usando técnicas de interpretación visual.
- Integración de mapas temáticos usando técnicas de SIG para el análisis de dispersión urbana y el análisis de cambio del uso de suelo.
- Determinación de áreas para urbanización basadas en la población, su proyección crecimiento y la ubicación de los centros de crecimiento.
- Cálculo de los requerimientos de tierra para el desarrollo urbano basado en la capacidad de carga de la región.
- Proyección del uso de la tierra urbana basado en el análisis de idoneidad.
- Análisis de sensibilidad ambiental urbana con base tanto física, así como de los parámetros de calidad del aire.
- Determinación del índice de funcionalidad compuesto para configurar diversos servicios como la educación, médicos, recreativos, de movilidad, etc.

BASES DE DATOS GEOGRÁFICAS Y URBANAS

Los datos geográficos y las herramientas geoespaciales contribuyen a la gestión urbana eficiente. Los resultados se ven reflejados en la reducción de costos y la mejora de los servicios prestados a la población en las ciudades. Los sensores remotos y los SIG facilitan el mapeo de áreas urbanas y el monitoreo de los cambios en la cobertura del suelo (Peijun et al., 2014; Schneider, Friedl, Mclever, & Woodcock, 2003). Existe una gran variedad de sensores remotos (Lillesand et al., 2008) y cientos de usos y aplicaciones (Schott, 2007; Schowengerdt, 2006).

En el caso de la planeación local y monitoreo urbano la combinación de sensores resulta de gran utilidad. Al respecto, durante las últimas dos décadas se han realizado avances cartográficos (Sylos-Labini, Drimaco, Manunta, Agrimi, & Pasquariello, 2012), reportándose como procesos eficientes para la extracción de caminos (Hu, Tao, & Wu, 2004) o para la caracterización de áreas urbanas en degradación, lo cual es de gran utilidad para las ciudades que requieren monitoreos a mayor escala (Zhou, 2007). También se usan en estudios de expansión urbana (Xiao et al., 2006; Bhatta, 2010), evaluaciones de impermeabilidad (Hogson, Jensen, Tullis, Riordan, & Archer, 2003), conectividad de hábitat (Luoto, Kuussaari, & Toivonen, 2002), riqueza de especies (Goetz, Steinberg, Dubayah, & Blair, 2007), cambios en el microclima o modelación en 3D (Zhou, 2007) o estimaciones de almacenamiento de carbono (Karna et al., 2015), entre otros.

La tecnología LIDAR genera información 3D, la cual es de gran utilidad para resolver los problemas de resolución de datos (Benhamu & Doytsher, 2003; Kaufmann & Steudler, 1998; Larsson,

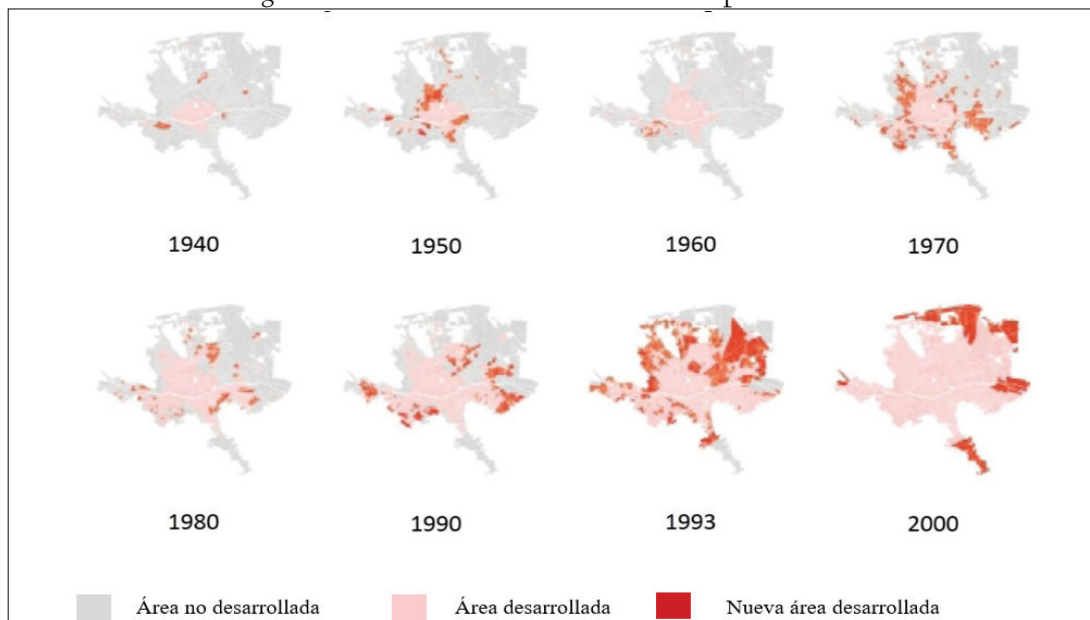
1991; Stoter, 2000; Stoter & Salzmann, 2003) y caracterizar la superficie y cobertura del suelo (Dubayah, 2000). LIDAR emerge durante las últimas dos décadas como una herramienta eficaz en las áreas de topografía (Baltasavias, 1999; Kilian, Haala, & Englich, 1996; Kraus & Pfeifer, 1998; Harding & Berghoff, 2000), forestal (Parker, 1995; Parker, 1997; Lefsky, 1997), planeación estratégica, hidrología, riesgos, y planeación urbana (Rottensteiner & Briese, 2002).

EL CRECIMIENTO DEL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY

El desarrollo del AMM desde sus orígenes se ha descrito de manera detallada por autores como Gaza y Rodríguez (1998) y García et al. (2011) quienes relatan la fundación de la ciudad entre 1624 y 1638, y señalan que a inicios del siglo XIX Monterrey apenas contaba con unos 6,200 habitantes, pero un siglo después, en 1900, su población se había incrementado a 72,250 habitantes luego de experimentar un proceso de desarrollo comercial e industrial.

El proceso de metropolización se registró entre 1960 y 1970 con la integración de algunos municipios llegando a alcanzar los 1,600,000 habitantes. Para los años ochenta ya se conocía la zona metropolitana con los municipios de Monterrey, San Nicolás, Guadalupe, San Pedro Garza García, Santa Catarina, García, General Escobedo, Juárez y Apodaca y la población había alcanzado los 3 millones de habitantes ocupando una superficie de 2,456km². Este crecimiento se puede observar en la figura 1, la cual fue adaptada de la información publicada por la Subsecretaría de Desarrollo Urbano de Nuevo León a través del Centro de Colaboración Geoespacial, área pública inmersa en la Dirección General de Planeación Urbana y Regional y la publicación del CEDEM (2005).

Figura 1. Crecimiento histórico del AMM por décadas.



Fuente: elaboración propia con base en CEDEM (2005).

La manera dispersa y desordenada en la que se ha desarrollado el AMM durante las últimas cuatro décadas se asocia al rápido crecimiento poblacional (García et al., 2011), producto de la inmigración de la población de estados vecinos y a las normativas laxas o incluso inexistentes de desarrollo urbano. Las decisiones de quienes en su momento formaron parte de la directriz de desarrollo del AMM, siguen presentes al observar el desorden del crecimiento de la ciudad, pues existen diferencias notorias entre los desarrollos urbanos por zonas, su densidad, forma y características de construcción. En la figura 2 se muestran tres áreas de 2.5 ha con distintas densidades de urbanización: 1) la densidad alta dentro de la Colonia Cerro de la Campana y 2) la media en la Colonia San Juanito en Contry, ambas en el municipio de Monterrey; y 3) la densidad baja en la Colonia del Valle en el municipio de San Pedro Garza García.

Figura 2. Áreas de 2.5 ha donde se muestra la diferencia de la densidad urbana en el AMM.



Fuente: elaboración propia.

El crecimiento acelerado del AMM provocó una rápida afluencia de desarrollos habitacionales en áreas riesgosas o de baja aptitud para el desarrollo (figura 3). En la ciudad pueden observarse tanto asentamientos irregulares, como edificaciones de viviendas unifamiliar y multifamiliar sobre cerros con pendientes mayores a 45%, muchos de éstos desarrollos fueron realizados décadas atrás y resulta difícil verificar si cada uno de ellos contó con los permisos correspondientes y si éstos cumplieron con los estudios hidráulicos, geológicos, geotécnicos o de mecánica de suelos y geofísicos, que entre otros, son citados como necesarios en los reglamentos de desarrollo urbano y que guían el dictamen de los permisos

Durante toda una década, en el AMM aumentaron los permisos y autorizaciones de ventas de vivienda, presentándose proyectos ejecutivos que se estimaron en 3,803 de 1989-1999 y que obtuvieron autorizaciones de ventas por más de 5,800 ha (ver tabla 3). Es decir, un promedio de 1.54 ha por permiso en una década pero con incremento del 14% de una administración a otra (Secretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas, 2000 citado por CEDEM, 2005). Sin embargo, no todos los documentos que acreditan los permisos están disponibles y una forma de comprobar el crecimiento de la ciudad es utilizando sensores remotos.

Figura 3. Desarrollo urbano en el Municipio de Monterrey.



Fuente: elaboración propia.

ESTUDIO DE CASO

El 20 de diciembre del 2014 un grupo de 20 colonos denunció (por la vía legal) daños a sus viviendas provocados por los trabajos de terracería en el predio localizado al sur de la ciudad (figura 4). El permiso de urbanización (bajo oficio No. 139.04.1-873 -13) se otorgó para el cambio de uso de suelo el 16 de Agosto del 2013, un terreno que por más de 40 años fue un área verde urbana. La emisión fue autorizada por la Delegación de la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Subdelegación de Gestión para la Protección Ambiental y Recursos Naturales.

Figura 4. Predio mostrando los trabajos de terracería y desmante.



Fotografías tomadas desde la vista superior (izq.) y de la vista inferior izquierda (der.) Fuente: tomadas por Dr. Juan Pablo Solís.

El objetivo fue analizar técnicamente la topografía con base en el porcentaje de pendiente previa al inicio de la urbanización y emitir una opinión sobre su viabilidad, la cual además debería tomar en cuenta los lineamientos de urbanización del Municipio de Monterrey para la vivienda unifamiliar.

Figura 5. Nota periodística con vecinos afectados denunciando daños en sus viviendas y cartel de denuncia ciudadana.

Denuncian daños en viviendas por trabajos de fraccionamiento

EN LA PARED

Vecinos de la Colonia Las Brisas en Monterrey, denunciaron ayer que sus viviendas están sufriendo daños por los trabajos que se realizan para la construcción de un desarrollo modular que está en una zona de pendiente de un cerro.

Con severas cuarteaduras en las paredes de la terraza y hundimientos en el piso que conecta con la base de la barda, se encuentra la casa de Edla Alvarez, vecina del sector.

La afectada señaló que los daños en su casa comenzaron a evidenciarse a raíz de que las maquinarias iniciaron excavaciones en la zona donde se edificarán 70 viviendas.


"Hay mucho movimiento, por lo que le han estado raspando el cerro y eso es lógico. Aquí abajo era área forestal, entonces ya no vamos a tener pasado, vecinos del sector de sujeción la construcción de un terreno que, digamos, es apto para edificaciones de ningún tipo por el nivel de pendiente que presenta, además de que está la gran actividad de las maquinarias y deslaves.

En dos ocasiones, los colonos impidieron que continuaran los trabajos hasta que no les mostraron los permisos para continuar con la obra.

El pasado 27 de enero, la Secretaría del Ayuntamiento de Monterrey, Sandra Pineda, y la Secretaría de Desarrollo Urbano de Monterrey, Brenda Sánchez, se reunieron con ellas para mostrar los estudios de pendientes que ellos solicitan al municipio.

En ellas se descarta que el predio supere la inclinación permitida, por lo que vecinos exigieron que se revisen de nuevo.

SR. GUILLERMO CUEVA SADA, DELEGADO DE LA SEMARNAT, NUEVO LEON



Los vecinos de LAS BRISAS le exigimos cancelar el permiso de uso de suelo que USTED otorgó del predio ubicado a un costado de BLVD ACAPULCO entre PUERTO GALERA y CHAMPOTÓN forestal por más de 40 años fue AREA FORESTAL. En menos de 4 meses usted autorizó este CAMBIO DE USO DE SUELO sin consultarnos a los VECINOS.

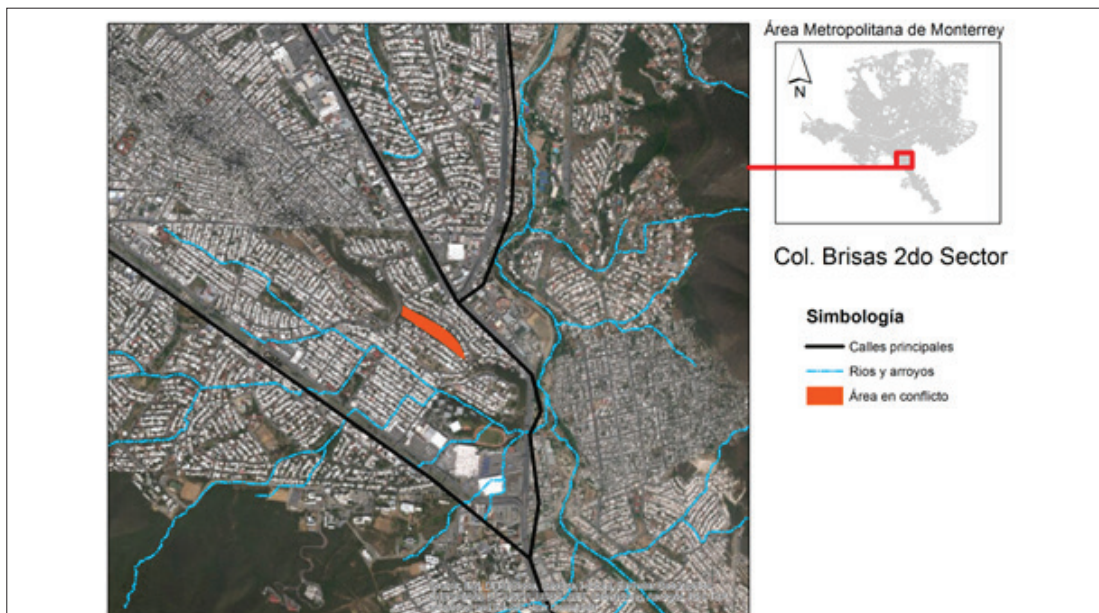
La delegación de SEMARNAT que usted encabeza autorizó bajo oficio NO. 139.04.1-873(13) emitido por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Subdelegación de Gestión para la Protección Ambiental y Recursos Naturales, con fecha de 16 de agosto del 2013 relativa a la autorización del cambio de uso de suelo en terrenos forestales para el desarrollo del proyecto denominado Residencial Solaria Brisas en una superficie de 2.328000 hectáreas.

USTED HA PUESTO EN RIESGO NUESTRO PATRIMONIO

UBICACIÓN DEL ÁREA

El predio localizado al sur de la ciudad (ver figura 6), con uso de suelo catalogado como “baldío”, con superficie aproximada de 2.4 ha, se encuentra encapsulado por casas habitación entre las calles Puerto de Galera al Oeste, Champotón al Este, Telchac al Sur y Bulevar Acapulco.

Figura 6. Localización del predio.

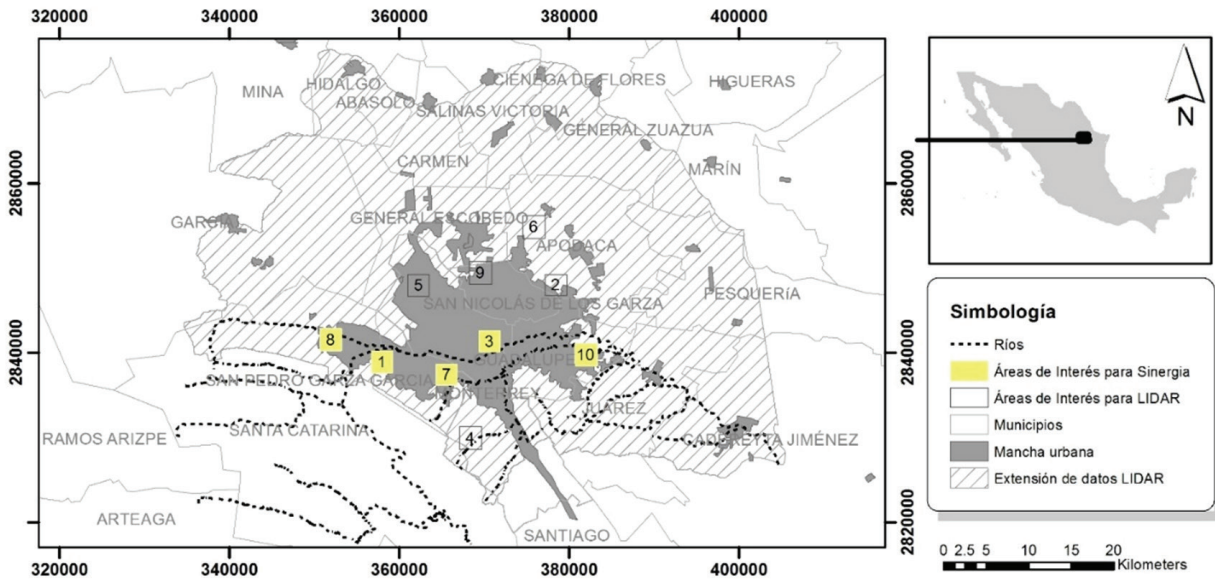


Fuente: elaboración propia

DATOS

Los datos utilizados en este ejercicio fueron generados durante la segunda semana de diciembre de 2010 por la compañía Merrick Company y financiados por la Comisión Nacional del Agua. El sensor estaba programado para alcanzar resoluciones de 0.70 m (xy), en un muestreo de 140 líneas de vuelo (mil metros de ancho) correspondientes a un total de 2,266 millas de vuelo y para el cual se tomaron 35 puntos de control en tierra (figura 7), logrando cubrir un área de aproximadamente 2,022.75 km², con una precisión vertical de acuerdo al RMSE de 0.10 m (z), como se observa en la tabla 1, donde se muestra el reporte de calidad de la información cruda, demostrando un RMSE de 0.10 vertical.

Figura 7. Líneas de vuelo, puntos de control en tierra.



Fuente: elaboración propia

MÉTODOS

Clasificación de los datos LIDAR: Los elementos del terreno urbano incluyen: paisaje natural, vegetación nativa y ornamental, suelo o roca, edificios, superficies de caminos, corredores, y otras estructuras o construcciones (Burian et al., 2004). Para llevar a cabo el análisis de la nube de puntos, se utilizó un filtro previamente diseñado (Yépez, 2013). El filtro actúa semiautomáticamente y utiliza los algoritmos *de Elevation, Intensity, Building, Reclassify* y *Adjustable Profile Line Tool* del programa MARS6 Explorer de Merrick Company. Las estadísticas del filtrado se realizaron con la herramienta *Tile Statistics* de dicho programa.

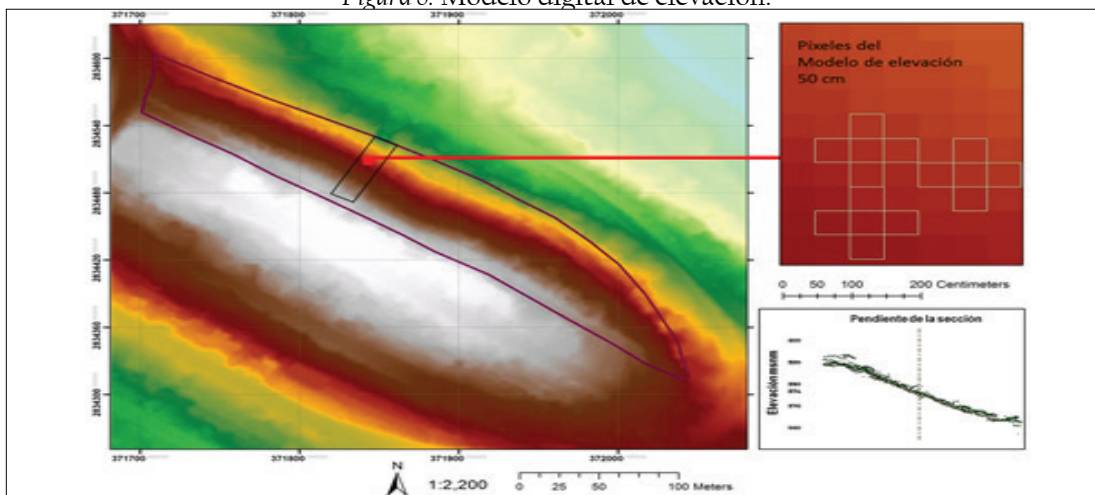
Tabla 1. Resultados del análisis de control de autofiltro.

Unidades del proyecto	Metros
Fecha	Martes
Precisión Vertical Objetivo	
Tipo de Requerimiento	RMSE(z)
RMSE(z) Objetivo	0.1
Control de puntos en Reporte	35
Método de Cálculo de Elevación	Interpolado del TIN
Puntos de control en la cobertura LIDAR	35
Promedio Reportado del Error de Control	0
Máximo (el más alto) Error de Control Reportado	0.16
Media del Error de Control Reportado	0
Mínimo (el más bajo) Error de Control Reportado	-0.14
Desviación Estándar (sigma) del error para muestra	0.06
RMSE del Error de la muestra RMSE(z)	0.06
NSSDA Intervalo de Contorno Alcanzable	0.3
ASPRS Class 1 Intervalo de Contorno Alcanzable	0.2
NMAS Intervalo de Contorno Alcanzable	0.3

Fuente: elaboración propia.

Análisis de las pendientes y rumbos: Los puntos identificados en el filtrado como “suelos” fueron utilizados para generar un Modelo Digital de Elevación (MDE), cuya resolución espacial fue de 0.50 m. El análisis de las pendientes se realizó con el MDE (figura 8) y utilizando el programa PCI Geomatics y ERDAS Imagine, con un modelo para el cálculo basado en la distancia vertical y horizontal de cada uno de los píxeles.

Figura 8. Modelo digital de elevación.



Fuente: elaboración propia

Debido a que el método de Zevenbergen y Thorne (1987) (figura 9) deriva la pendiente de una ecuación cuadrática:

$$Z = Ax^2 + Cy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I$$

Donde los nueve parámetros son determinados por nueve elevaciones (valores sobre Z) con ventanas de 3x3 usando los polinomios Lagrange como se demuestra a continuación:

$$A = [(Z_1 + Z_3 + Z_7 + Z_9)/4 - (Z_2 + Z_4 + Z_6 + Z_8)/2 + Z_5] / L^4$$

$$B = [(Z_1 + Z_3 - Z_7 - Z_9) / 4 - (Z_2 - Z_8) / 2] / L^3$$

$$C = [(-Z_1 + Z_3 - Z_7 + Z_9) / 4 - (Z_4 - Z_6) / 2] / L^3$$

$$D = [(Z_1 + Z_3) / 2 - Z_5] / L^2$$

$$E = [(Z_2 + Z_8) / 2 - Z_5] / L^2$$

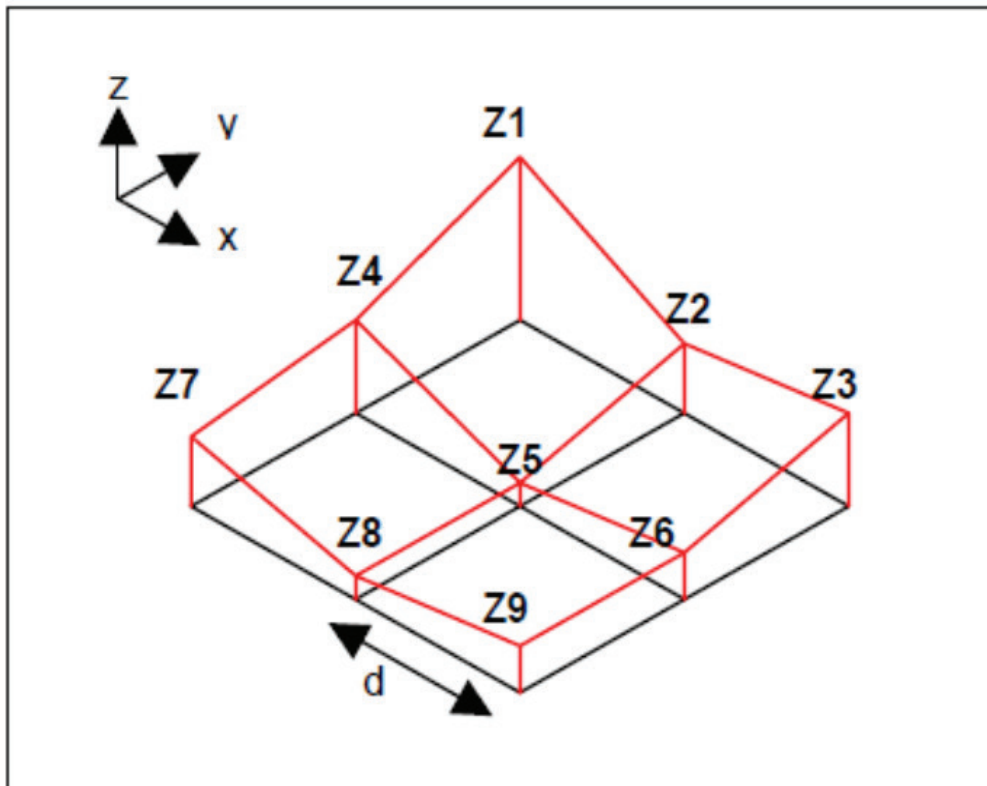
$$F = (-Z_1 + Z_3 + Z_7 - Z_9) / 4L^2$$

$$G = (-Z_2 + Z_8) / 2L$$

$$H = (Z_4 + Z_6) / 2L$$

$$I = Z_5$$

Figura 9. Modelo de Zevenbergen y Thorne.



Fuente: tomado de Zevenbergen y Thorne (1987).

El índice de pendiente se encuentra diferenciando la ecuación siguiente y resolviendo la ecuación resultante para el punto central. Aunque conceptualmente este método utiliza una ventana de tres en tres para calcular la pendiente, las matemáticas simplifican el uso de sólo cuatro puntos de datos.

$$\text{PENDIENTE} = \partial Z / \partial S = G \cos \theta + H \sin \theta$$

$$\text{PENDIENTE} = \frac{G}{\sqrt{G^2 + H^2}}$$

PCI Geomatics y ERDAS Imagine usan la combinación del algoritmo de Zevenbergen y Thorne (1987) junto con otros, para calcular la relación entre distancias y pendientes, a partir de lo siguiente:

- 45° es una pendiente de 100%
- 90° es una pendiente de 200%
- Pendientes menores a 45° pertenecen al rango de 1 – 100%
- Pendientes entre 45° y 90° pertenecen al rango de 100 – 200%

El aspecto (rumbo) se expresó en grados, en sentido horario de 0 a 360, donde el debido norte es 0 cuando el valor de 361 denota una superficie plana.

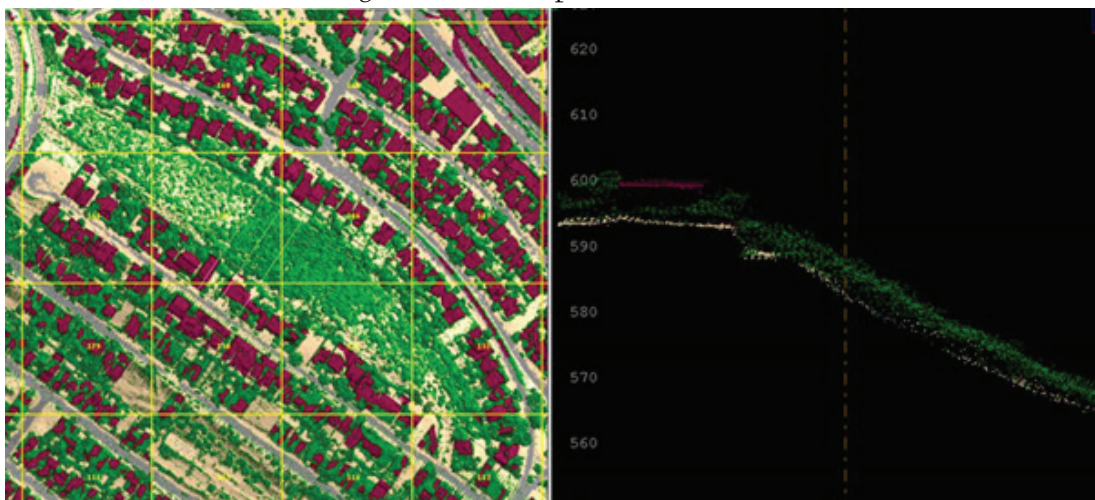
$$\text{ASPECTO} = \theta + 180; \text{ donde, } \theta = \tan^{-1} (\Delta X / \Delta Y)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CLASIFICACIÓN DE LOS DATOS LIDAR

El resultado del filtrado se observa en la figura 10. El filtro permitió identificar suelos, pavimentos, edificación, vegetación, con una precisión del 92.4% de acuerdo con el coeficiente de Kappa. Sin embargo, destacan en orden de mayor a menor precisión las clases de vegetación (95%), edificios (94%), pavimentos (89%) y suelos (87%). Abajo se puede observar que en el 2010 el predio estaba cubierto por vegetación hasta un 70% del área, y de ésta al menos 40% alcanzaba una altura de 7m. Cabe señalar que, aunque las pendientes y la altura de la vegetación son datos que fácilmente se pueden valorar en terreno, una vez desmontado es imposible validar esta información, al menos que se cuente con los registros de información necesarios, como lo es en este caso.

Figura 10. Nube de puntos clasificada.



Fuente: elaboración propia.

Estadísticas del filtrado

Los resultados del filtrado se muestran en las estadísticas realizadas a la nube de puntos del predio con base en una red de cuadrados de 10 x 10 m (295 en total), con un total de 23,474 puntos y un promedio de 8 puntos por metro cuadrado (ver tabla 2).

Tabla 2. Clases de cobertura encontradas en el predio.

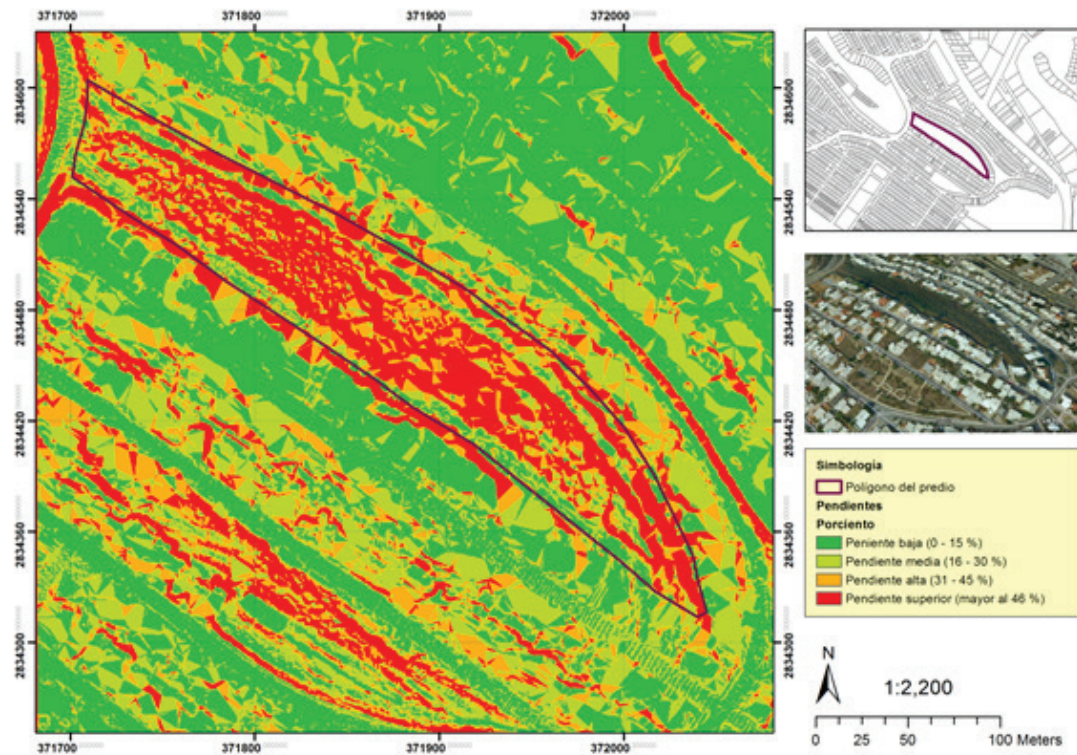
Estadístico	Total	Suelo	Vegetación	Edificios
Suma	23474	7145	16264	65
Promedio	80	24	55	0
Máximo	135	98	106	17
Mínimo	33	3	29	2
Mediana	92	19	59	0
Moda	99	5	45	0
Desv. Est.	33	20	29	2

Fuente: elaboración propia.

Pendientes

En el 2010 al menos 49.7% de la superficie del predio tenía pendientes mayores a 45%, mientras que 24% de la superficie presentó pendientes entre 30% y 35% (ver tabla 3). Las cuales se encontraban dispersas en el 80% del terreno, como se observa en la figura 11.

Figura 11. Resultado de las pendientes por nivel (porcentaje) en el predio.



Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Pendientes y porcentajes del área en análisis.

Clasificación de la pendiente	Pendiente %	Área en m ²	Porcentaje
Pendiente baja	0-15	2,407.06	10.1
Pendiente media	15.1-30	3,853.15	16.2
Pendiente alta	30.1-45	5,726.32	24.0
Pendiente superior	45.1 o mayor	11,861.76	49.7

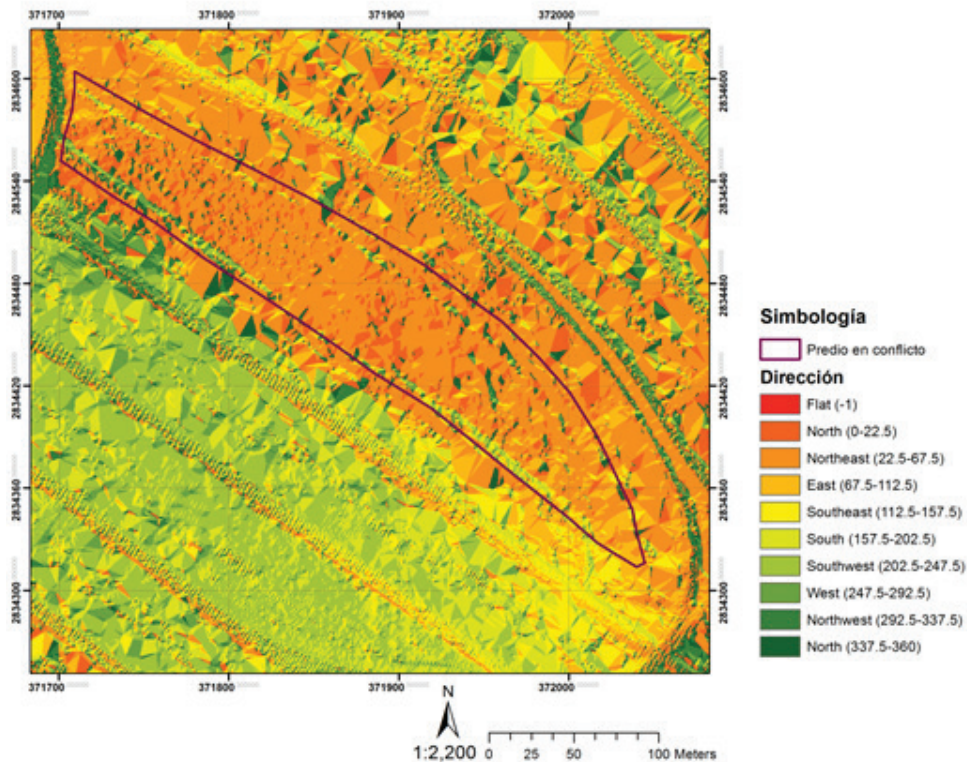
Fuente: elaboración propia.

La interpretación es tan importante, como lo es el análisis, porque puede afectar el resultado final. Durante los últimos 5 años, han sido numerosos los casos en los cuales los permisos de construcción pasan por alto los valores de las pendientes. Los métodos para el cálculo de pendiente de un modelo de elevación digital han sido reportados por Jones (1998), quien describe 8 algoritmos para calcularla, encontrando el algoritmo de segundo orden y el de diferencia finita desarrollados por Zevenbergen y Thorne (1987) y Flemming y Hoffer (1979).

Rumbos

Por otra parte, el análisis de los rumbos (aspecto), indica que el 90% del terreno presenta rumbos de Norte-Noreste (ver figura 11), que es la dirección hacia donde podrían caer sedimentos, rocas, equipo, maquinaria o cualquier tipo de material por efecto de gravedad y que afectaría a las viviendas de abajo. Este dato es de relevancia y se verifica con las fotografías presentadas en la figura 4.

Figura 12. Resultado de las direcciones de la topografía en el predio.



Nota: Las flechas indican el rumbo y la ubicación de las casas de los vecinos. Fuente: elaboración propia.

Lineamientos urbanísticos

Cada municipio debe contar con un plan de desarrollo, el cual debería ser un sistema dinámico que verdaderamente sirviera como eje rector en la toma de decisiones locales. Existen lineamientos urbanísticos que mencionan las pendientes del terreno y las densidades urbanas para el desarrollo municipal, en el caso de Monterrey, se encuentran en el Plan de Desarrollo Municipal (Sedue, 2009) como se presenta la tabla 4.

Tabla 4. Densidades y lineamientos urbanísticos.

Uso de suelo	Tipo	Clasificación de la zona	Densidad Viv/ha	Lineamientos			
				COS	CUS	CAV	
Habitacional unifamiliar		Densidad baja		0.8	2	0.1	
		Densidad media y alta		0.8	2	0.1	
Habitacional unifamiliar en zonas de crecimiento controlado	D	Pendiente baja 0-15%	24	0.75	1.5	0.15	
	C	Pendiente media 15.01-30%	14	0.6	1.3	0.25	
	C	Pendiente alta 30.01 – 45%	6	0.4	0.8	0.3	
		Pendiente superior al 45%	No urbanizable				
	C	D1 Densidad baja	8	0.4	0.7	0.3	
	C	D2 Densidad baja	12	0.5	0.7	0.25	
	D	D3 Densidad baja	25	0.6	1.2	0.2	
	Habitacional multifamiliar en las siguientes zonas: habitacional multifamiliar, habitacional con comercio, mixto ligero, mixto medio, y mixto intenso	E	D4 Densidad baja	33	0.6	1.2	0.2
	E	D5 Densidad media	42	0.7	1.4	0.15	
	F	D6 Densidad media	56	0.7	1.5	0.15	
	G	D7 Densidad media	67	0.75	1.7	0.13	
	G	D8 Densidad media	83	0.75	2	0.13	
H	D9 Densidad media	95	0.75	2.5	0.13		
H	D10 Densidad alta	105	0.75	3	0.15		
I	D11 Densidad alta	120	0.75	5	0.15		
I	D12 Densidad alta	150	0.8	Libre	0.1		
Habitacional multifuncional en zonas de crecimiento controlado y zonas especiales de desarrollo	D	Pendiente baja 0-15%	24	0.75	1.5	0.15	
	C	Pendiente media 15.01-30%	14	0.6	1.3	0.25	
	C	Pendiente alta 30.01-45%	6	0.4	0.8	0.3	
		Pendiente superior al 45%	No urbanizable				

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

En este estudio se mostró que los rápidos cambios del entorno urbano pueden y deben ser monitoreados periódicamente. La diversidad actual de sensores permite escoger la mejor opción de acuerdo a sus características de resolución espectral, espacial y multitemporalidad con el objetivo de generar la mejor información 3D y de alta resolución del área de interés.

En el caso de estudio se demostró que aun cuando el terreno ha sido alterado por el proceso de

urbanización, es posible identificar detalles topográficos como pendientes y características dasométricas de la vegetación (altura y cobertura) si se cuenta con el registro de datos LIDAR previo a la fecha de alteración. Esta información es de especial importancia cuando el objetivo es analizar áreas en conflicto por el proceso de urbanización.

La extracción de la información cartográfica se logró con gran precisión (93%), encontrando principalmente árboles y suelo. Sin embargo, más del 70% del predio presentó pendientes entre 30 y 45%, cuando este terreno fue destinado a uso habitacional - unifamiliar y por motivo de estas pendientes, la urbanización debe ser mínima (6 casas habitación por hectárea). El terreno presentó zonas de crecimiento controlado con pendientes superiores a 45%, las cuales no deben ser urbanizadas.

El rumbo de la pendiente, dirigido hacia el Norte y Noreste del terreno, indica que cualquier movimiento de tierra, manejo de equipo o construcción, pone en riesgo el asentamiento de 24 casas habitación y a sus habitantes, debido a que se encuentran a escasos metros del área analizada. Por lo que, tomando en cuenta todo lo anterior y de acuerdo a los lineamientos urbanísticos del municipio de Monterrey se concluyó que el predio no cumple y no cumplía desde el 2010 con las características de urbanización.

RECOMENDACIONES

Además de que se espera que este análisis sirva como evidencia técnica para la revocación del permiso de urbanización del predio en cuestión, se considera urgente que el AMM cuente con un sistema de monitoreo en alta resolución del cambio en la cobertura y uso de suelo. Sin embargo, igual de importante es la participación ciudadana, no es necesario esperar hasta que la casa sea dañada para reaccionar ante las inapropiadas prácticas de desarrollo urbano, el incumplimiento de lineamientos urbanísticos o las violaciones a la normativa ambiental.

Se conoce que la Subsecretaría de Desarrollo Urbano de Nuevo León a través del Centro de Colaboración Geoespacial analiza los datos de la ciudad, pero hasta el momento, se ignoran sus capacidades, o si existe un Plan de Gestión Urbana que plantee el monitoreo de la cobertura de manera periódica y en alta resolución. También se desconocen las prácticas de verificación de los estudios técnicos por parte de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, o si cuenta con el personal capacitado.

Por lo anterior se considera que la inversión de un sistema geográfico para la gestión urbana (en alta resolución y 3D) sería de gran utilidad para múltiples áreas de aplicación. Algunas de las aplicaciones apoyarían a la planificación de instalaciones y equipamiento urbano, del transporte y ambiental, a la autorización de permisos de cambios de uso de suelo, la detección de la invasión de áreas protegidas, el registro de asentamientos irregulares, entre muchas otras cosas.

AGRADECIMIENTOS

Las fotografías del predio fueron concedidas por el Dr. Juan Pablo Solís y los datos LIDAR 2010 fueron obtenidos a través de la Comisión Nacional del Agua.

REFERENCIAS

- Alberti, M. (2005). The effects of urban pattern on ecosystem function. *International Regional Science Review*, 28 (2): 168-192.
- Baltsavias, E. (1999). A comparison between photogrammetry and laser scanning, *ISPRS Journal of Photogrammetry. Remote Sensing*, 54, 83-94.
- Bhattha, B. (2010). *Analysis of urban growth and sprawl from remote sensing data*. Berlin: Springer Publishers.
- Benhamu, M., & Doytsher, Y. (2003). Toward a Multi-space 3D cadastre in Israel. *Computers, Environment and Urban Systems*, 27, 359-374.
- Burian, S.J., Stetson, S.W., Han, W., Ching, J., & Byun, D. (2004). High - resolution dataset of urban canopy parameters for Houston Texas. *Fifth Conference on the Urban Environment*. American Meteorological Society, Vancouver.
- Carleer, A.P., & Wolff, E. (2006). Urban Land Cover Multi-level Region-based Classification of VHR Data by Selecting Relevant Features. *International Journal of Remote Sensing*, 27 (5-6), 1035-1051.
- CEDEM (2005). *Análisis Estratégico del Área Metropolitana de Monterrey: Un diagnóstico para el desarrollo*. Monterrey: ITESM.
- CIA (2014). *The world factbook*. Central Intelligence Agency of the United States of America. Recuperado de <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/mx.html>.
- Conavi (2010). *Desempeño del sector vivienda en México*. Recuperado de <http://www.conavi.gob.mx/>
- Chester, L. A., & Gibbons, J. (1996). Impervious Surface Coverage: The emergence of a key environmental indicator. *Journal of the American Planning Association*, 62 (2), 243-258.
- Dubayah, R. R. (2000). Land surface characterization using LIDAR remote sensing. En M. Hill, *Spatial information for land use management* (pp. 25-38). Sigaporeq: International Publishers Direct.
- Fleming, M.D., & Hoffer, R.M. (1979). *Machine processing of Landsat MSS data and DMA topographic data for forest cover type mapping* (Technical Report 062879). Laboratory for Applications of Remote Sensing, Purdue University. West Lafayette, Indiana.
- García, R., Arzaluz, S., & Fitch J. M. (2011). Procesos y tendencias de la urbanización en el noreste mexicano. *Economía, Sociedad y Territorio*, 11 (35), 253-264.
- Gaza, G., & Rodríguez, F.A. (1998). *Normatividad urbanística en las metrópolis de México*. México: El Colegio de México.
- Goetz, S., Steinberg, D., Dubayah R., & Blair, B. (2007). Laser remote sensing of canopy habitat heterogeneity as a predictor of bird species richness in an eastern temperate forest, USA. *Remote sensing of Environment*, 108 (3), 254-263.
- Harding, D.J., & Berghoff, G.S. (2000). Fault scarp detection beneath dense vegetation cover: Airborne lidar mapping of the Seattle fault zone, Bainbridge Island, Washington State. *Proceedings of the American*

- Society of Photogrammetry and Remote Sensing Annual Conference*, Washington.
- Hodgson, M.E., Jensen, J.R., Tullis, J.A., Riordan, K.D., & Archer, C.M. (2003). Synergistic use of Lidar and color aerial photography for mapping urban parcel imperviousness. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69 (9), 973-980.
- Hu, X., Tao, C. V., & Hu, Y. (2004). *Automatic road extraction from dense urban area by integrated processing of high resolution imagery and lidar data*. Recuperado de <http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm3/papers/288.pdf>
- INEGI (2007). *Delimitación de las zonas metropolitanas de México en 2005*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Jones, K. H. (1998). A comparison of algorithms used to compute hill slope as a property of the DEM. *Computers & Geosciences*, 24 (4), 315-323.
- Kauffman, J., & Steudler, D. (1998). *Cadastré 2014 - A vision for a Future Cadastral System*. Switzerland: Rüdlingen and Bern. Recuperado de <http://www.fig.net/cadastré2014/translation/c2014-english.pdf>
- Karna, Y.K., Hussin, Y.A, Gilani, H., Bronsvend, M.C. Murthy, M.S.R., Quamer, F. M., ...Baniya, C. B. (2015). Integration of WorldView2 and airborne LIDAR data for tree species level carbon stock mapping in Kayar Khola watershed, Nepal. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 38, 280-291.
- Kilian, J., Haala, N., & Englich, M. (1996). Capture and evaluation of airborne laser scanner data. *International Archives of Photogrammetric and Remote Sensing*, 31, 383-388.
- Kraus, K., & Pfeifer, N. (1998). Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanning. *Photogrammetry and Remote Sensing*, 53, 93-203.
- Leopold, L.B. (1968). *Hydrology for Urban Planning—A Guidebook on the Hydrologic Effects of Urban Land Use*. Washington: US Geological Survey.
- Larsson, G. (1991). *Land registration and cadastral systems: tools for land information and management*. Essex, England: Longman Scientific and Technical.
- Lefsky, M. (1997). *Application of LIDAR remote sensing to the estimation of forest canopy and stand structure*. Charlottesville: Department of Environmental Science, University of Virginia.
- Lillesand, T., Kiefer, R.W., & Chipman, J. (2008). *Remote Sensing and Image Interpretation* (6ta Ed.). Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Lowe, M. D. (1991). *Shaping Cities: The Environmental and Human Dimensions*. Worldwatch paper 105. Washington, D.C: Worldwatch Institute.
- Luoto, M., Kuussaari, M., & Toivonen, T. (2002). Modelling butterfly distribution based on remote sensing data. *Journal of Biogeography*, (29), 1027-1037.
- Moll, G. (1989). Designing the Ecological City. *American Forests*, 95 (3-4).
- Moll, G., & Petit, J. (1994). The Urban Ecosystem: Putting Nature Back Into the Picture. *Urban Forests*, 14 (5).
- Patkar, V.N. (2003). *Directions for GIS in Urban Planning*. Map Asia Conference, Urban Planning. Recuperado de <http://www.gisdevelopment.net/application/urban/overview/urban/overview/urban0042pf/htm>
- Parker, G. (1997). Canopy structure and light environment of an old-growth Douglas fir/western hemlock

- forest. *Northwest Science*, 71, 261-270.
- Parker, G. (1995). Structure and microclimate of forest canopies. En L. Lowman M. & N. Nadkarni, *Forest canopies: A review of research on a biological frontier*. San Diego, CA: Academic Press.
- Peijun D., Lium, P., Xia, J., Feng, L., Liu, S., Tan, K., & Cheng, L. (2014). Remote sensing image interpretation for urban environment analysis: Methods, systems and examples. *Remote sensing*, 6 (10), 9458-9474.
- Rottensteiner, F., & Briese, C. (2002). A new method for building extraction in urban areas from high resolution LIDAR data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 34 (3A), 295-301.
- Sánchez, M.T., Casado, J.M., & Bocco, G. (2013). La política de ordenamiento territorial en México: de la teoría a la práctica. Reflexiones sobre sus avances y retos a futuro. En M.T. Sánchez, G. Bocco & J.M. Casado (coord.), *La Política de ordenamiento territorial en México de la teoría a la práctica*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Sánchez, R., & Bonilla, A. (2007). *Urbanización, Cambios Globales en el Ambiente y Desarrollo Sustentable en América Latina*. Brasil: Instituto Interamericano para la Investigación sobre Cambio Global, Instituto Nacional de Ecología y United Nations Environment Programme.
- Sedue (2009). *Plan de Desarrollo Urbano del Municipio de Monterrey 2010 – 2020*. Recuperado de <http://portal.monterrey.gob.mx/gobierno/sedue/pdu.pdf>.
- Schneider, A., Friedl, M.A., Mcleaver, D. K., & Woodcock, C. E. (2003). Mapping urban areas by fusing multiple sources of coarse resolution remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69 (12), 1377-1386.
- Schott, J. R. (2007). *Remote sensing: The image chain approach* (2da Ed.). Oxford: Oxford University Press.
- Schowengerdt, R.A. (2006). *Remote sensing: Models and Methods for image processing* (3^{ra} Ed.). Florida: Academic Press.
- Stoter, J. (2000). Needs, possibilities and constrains to develop a 3D cadastral registration systems. *22nd Urban and regional data management symposium*. GDMC, Netherlands.
- Stoter, J.E., & Salzman, M.A. (2003). Towards a 3D cadaster: where do cadastral needs and technical possibilities meet? *Computers, Environment and Urban Systems*, 27 (4), 394-410.
- Stren, R. (1995). *Urban Research in the Developing World* (vol. 4). Toronto: Centre for Urban and Community Studies, University of Toronto.
- Sylos-Labini, G., Drimaco, D., Manunta, P., Agrimi, A., & Pasquariello, G. (2012). Synergy between Gmes and Regional Innovation Strategies: Very High Resolution Images for Local Planning and Monitoring. *European Journal of Remote Sensing*, 45, 305-315.
- Tiwari, D.P. (2003). Remote Sensing and GIS for Efficient Urban Planning. *Conference Proceeding of Map Asia*, Kuala Lumpur, Malaysia.
- UNICEF (2012). *El estado mundial de la infancia de 2012: Niñas y niños en un mundo urbano*. Mexico: UNICEF.
- UNCHS (1996). *An Urbanising World: Global Report on Human Settlements*. Oxford: Oxford University Press.
- Yépez, F. D. (2013). *Análisis sinérgico de sensores remotos para la evaluación y monitoreo del territorio del Área Metropolitana de Monterrey, su infraestructura urbana y uso de suelo* (Tesis doctoral). Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Monterrey, México.
- World Bank (1995). *The Urban Age*. World Bank: Washington, D.C.

- World Bank (2014). *Urban development. World Development indicators*. Recuperado de <http://data.worldbank.org/topic/urban-development>.
- Xiao, J., Shen, Y., Ge, J., Tateishi, R. Tang, Ch., Liang, Y., & Huang, Z. (2006). Evaluating urban expansion and land use change in Shijiazhuang China, by using GIS and remote sensing. *Landscape and Urban Planning*, (75), 69-80.
- Zevenbergen, L. W., & Thorne, C. R. (1987). Quantitative analysis of land surface topography. *Earth surface processes and landforms*, (12), 47-56.
- Zhou, G. (2007). Urban 3D Building Model from LIDAR data and digital aerial images. En Q. Weng (Ed), *Remote sensing of impervious surfaces*. (pp. 251-268). Taylor and Francis.

ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DE LOS USOS DE SUELO Y DEL CRECIMIENTO URBANO DE LOS MUNICIPIOS DE CULIACÁN Y NAVOLATO, SINALOA, MÉXICO

Geovanna Guadalupe Hinojoza Castro y Wenseslao Plata Rocha*

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han puesto en evidencia los notables cambios de uso y ocupación del suelo que ha sufrido, en general, todo el planeta. Las actividades humanas y los procesos naturales modifican los usos y coberturas del suelo, los cuales pueden tener consecuencias biofísicas, ecológicas, económicas, políticas y sociales importantes (Turner & Meyer, 1994). Ante este panorama se hace necesario comprender los patrones y procesos bajo los cuales se rige la dinámica de los usos y coberturas de suelo en las complejas interacciones entre los seres humanos y el medio ambiente desde escalas locales a globales (Aldwaik & Pontius, 2012).

El análisis de los cambios en los usos y coberturas del suelo nos ayudan a explicar el rango, la importancia y los efectos que éstos tienen en el medio ambiente y su relación con las actividades humanas. Dentro de dichos cambios, uno de los más significativos ha sido el aumento desmesurado de las superficies artificiales. Si bien las zonas urbanas ocupan hoy día tan solo el 2 por ciento de la superficie de la tierra, sus efectos en la alteración del medio son importantes a escala local, regional y global (Plata, Gómez, & Bosque, 2009).

Esta importante dinámica urbana se ha venido desarrollando en diferentes regiones del mundo (principalmente Europa y Norte América), como un modelo de crecimiento urbano difuso, denominado *Urban Sprawl*. El caso de México mantiene una sinergia con estas dinámicas de cambios

* Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Universidad Autónoma de Sinaloa, geohinojoza@gmail.com y wenses@uas.edu.mx

acelerados en el paisaje de los aproximadamente 2 millones de kilómetros cuadrados, siendo un caso alarmante, ya que es uno de los 5 países más ricos biológicamente (Groombridge & Jenkins, 2000) y, de acuerdo con la FAO (2010) las altas tasas de deforestación reportadas en la última década, lo ubican en la posición 17 a nivel mundial, con pérdidas de bosques de 195,000 hectáreas por año. De esta deforestación, el 38% está concentrada específicamente en las regiones noreste y noroeste del país (Pineda, 2010).

En este sentido, el Estado de Sinaloa, localizado en la región noroeste, ha tenido una dinámica desde el año 1976 hasta el 2006 que representa cambios considerables en el territorio, incrementando las tierras para agricultura de riego y agricultura de temporal en 296,000 hectáreas y en 376,500 hectáreas, respectivamente. Asimismo, se presentó un incremento de las superficies artificiales de 55,000 hectáreas; además se tuvieron 490,000 hectáreas de pérdidas de selvas y 250,000 hectáreas de agricultura de temporal (Corrales, 2013). Los cambios más representativos se observaron en los municipios del centro, donde se encuentra Culiacán (la capital del Estado) y el municipio de Navolato, que a pesar de ser el más joven de los 18 municipios, mantiene una intensa dinámica debido a su cercanía con la capital, a su potencial agrícola y a la inversión en proyectos turísticos relacionados con el Mar de Cortés. Ambos municipios presentan un aumento considerable en el área urbana, la cual en 1993 representaba 1.19% de la superficie de ambos municipios y que aumentó a 2.67% en 2011 (tabla 1).

El aglomerado urbano en torno a la ciudad de Culiacán es consecuencia de las dinámicas territoriales promovidas desde hace más de seis décadas y que tienden a la articulación del espacio rural y del litoral, lo cual está induciendo a la conformación de un área metropolitana en diferentes direcciones, como es el caso del corredor Culiacán-Navolato fundamentado en la inversión turística de la costa y la industria cercana a la Ciudad Capital; la articulación Culiacán, Costa Rica, El Dorado y Quilá relacionada con los agronegocios; el corredor Culiacán- Culiacancito conformado por pequeñas localidades dedicadas a la gastronomía y al campo; la ruta Culiacán, Imala y Sanalona constituida como un corredor destinado al turismo rural y deportivo (Roldán, 2006).

El presente trabajo tiene como objetivo analizar los cambios de usos del suelo de los Municipios de Culiacán y Navolato, la dinámica del crecimiento urbano y su intensidad por periodo de tiempo, por categoría y por transiciones entre categorías. Para esto se aplicará la metodología desarrollada por Pontius y Aldwaik (2007), denominada *Intensity Analysis*.

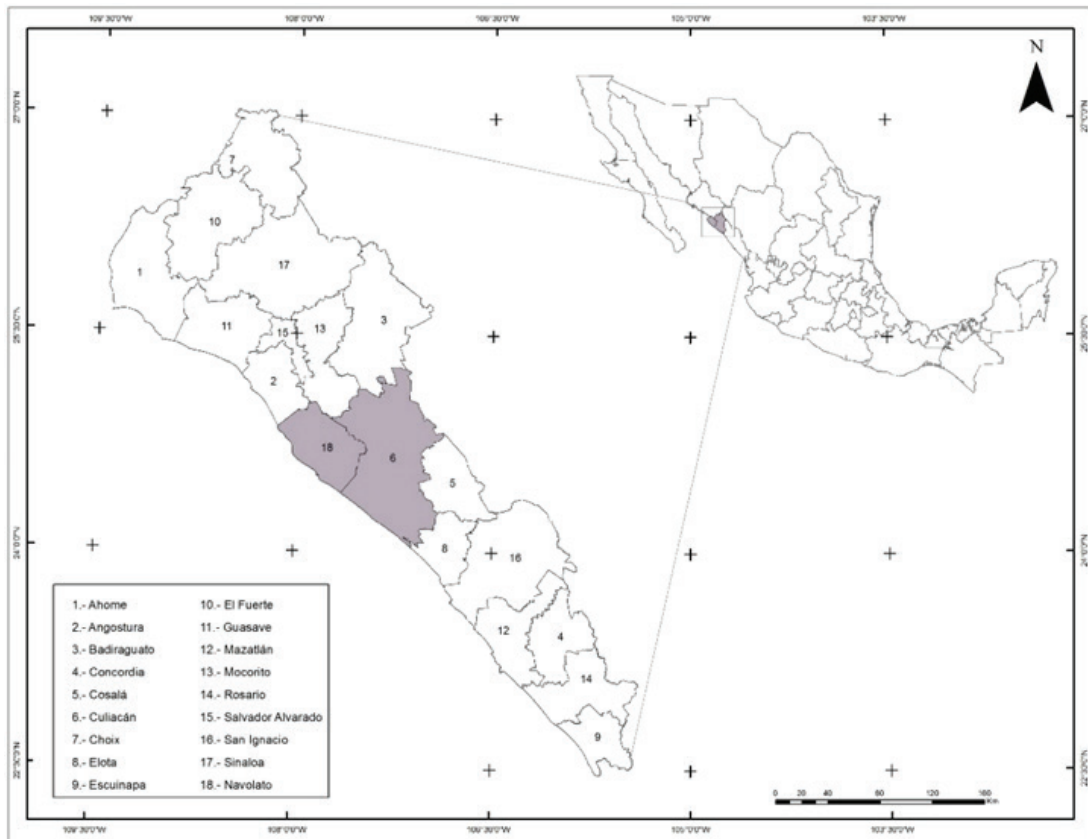
ÁREA DE ESTUDIO

El Estado de Sinaloa presenta una gran diversidad de usos y coberturas de suelo, los cuales se mantienen en una dinámica de cambio constante, causada por las actividades forestales, la agricultura, la expansión urbana, entre otras. Sinaloa es el Estado agrícola más importante del País, contando

con aproximadamente dos millones de hectáreas de agricultura de riego y temporal distribuida en todo su territorio. Su capital es la ciudad de Culiacán, centro industrial y agrícola de relevancia y capital del principal municipio que lleva el mismo nombre. El Municipio de Culiacán cuenta con una extensión territorial cerca de 6,283 km², aproximadamente 10.95% de la superficie del Estado, y con una población de 858,638 habitantes. Por otra parte, el municipio de Navolato colinda al noroeste con el municipio de Culiacán, cuenta con una extensión territorial de 2,477.20 km², cerca de 4.32% de la superficie del Estado, y alberga a un total de 135,603 habitantes (INEGI, 2010).

En conjunto, Culiacán y Navolato, ocupan un área de 8,760.84 km², representando el 15.27% de la superficie del Estado de Sinaloa (figura 1). La ciudad de Navolato está localizada a 24 Km de la ciudad de Culiacán y ambas ciudades presentan un fenómeno de conurbación metropolitana con un auge económico de gran relevancia (Roldán, 2006). Estos municipios han presentado un constante dinamismo, durante los últimos años se han venido presentando diferentes tipos de cambios, ya sea en la ocupación de los usos y coberturas de los suelos así como en el incremento en más de 100% de las áreas urbanas.

Figura 1. Área de estudio.



Fuente: elaboración propia.

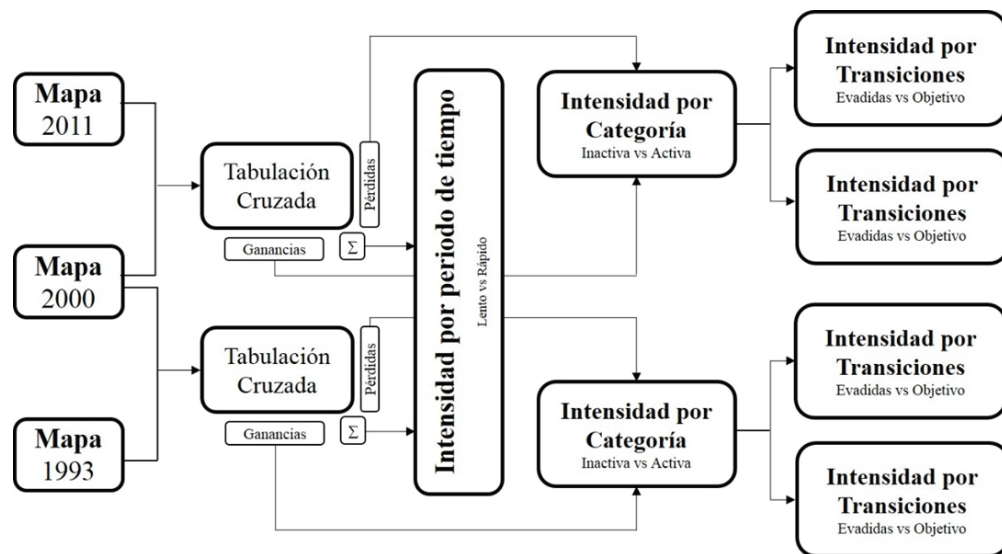
METODOLOGÍA

Para realizar el análisis se utilizaron 3 mapas de usos de suelo a escala 1:250,000, obtenidos del Instituto Nacional de Ecología (INE), del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y del Instituto de Geografía (IG) de la UNAM (Anexo A). El primer mapa cartográfico utilizado es del año 1993 (Serie II-INE) (Anexo A-1), el segundo corresponde al año 2000 (Serie III-IG) (Anexo A-2) y el tercero al 2011 (Serie V-INEGI) (Anexo A-4). Dichos mapas fueron elaborados con base en la interpretación visual de imágenes Landsat, mediante una actualización cartográfica prospectiva basada en la serie anterior correspondiente a cada mapa. Previo al análisis se realizó una homogenización de la leyenda con 11 categorías de uso y cobertura equivalente en los tres mapas, así como una validación y corrección de errores topológicos y temáticos.

Para analizar los cambios ocurridos así como también el crecimiento urbano presentado en los Municipios de Culiacán y Navolato se utilizó la metodología desarrollada por Pontius y Aldwaik (2007), llamada “*Intensity Analysis*”. Dicha metodología permitió detectar los cambios en el periodo estudiado de manera detallada en tres niveles: por periodo de tiempo, por categoría y por transiciones entre categorías. Dichos niveles analizan los cambios en hectáreas y con el indicador de la intensidad anual de dichos cambios, así como de las ganancias, pérdidas y transiciones entre usos de suelo (figura 2).

Como se observa en la figura 2, la metodología parte de la tabulación cruzada obtenida de los diferentes periodos de tiempo, en este caso de los años de 1993-2000 y 2000-2011. A partir de dicha matriz se obtienen las ganancias y las pérdidas (Pontius & Aldwaik, 2004), y se estudian los cambios ocurridos en el periodo de tiempo deseado pero en una forma más detallada (Pontius & Aldwaik, 2007).

Figura 2. Esquema metodológico para el análisis de los cambios.



Fuente: Modificado de Aldwaik y Pontius (2012).

En primera instancia se obtuvo S_t , es decir, el porcentaje de cambio anual para cada intervalo de tiempo para el cual fue utilizada la ecuación 1

$$S_t = \left(\frac{\text{área de cambio en el intervalo } [Y_t, Y_{t+1}] / \text{de la región de estudio}}{\text{duración del intervalo } [Y_t, Y_{t+1}]} \right) * 100\% \quad (1)$$

Por otro lado, con la ecuación 2 se calculó el valor uniforme del cambio por año, es decir, la intensidad de los cambios, misma que es basada en el valor uniforme (U) de dicha intensidad.

$$U = \left(\frac{\text{área de cambio en todos los intervalos} / \text{área de la región de estudio}}{\text{duración de todos los intervalos}} \right) * 100\% \quad (2)$$

Mientras que las ganancias (G_{ij}) y pérdidas (L_{ii}) de cada una de las categorías empleadas se calcularon a partir de las ecuaciones 3 y 4 respectivamente.

$$G_{tj} = \left(\frac{\text{área de ganancias totales de } j \text{ en } [Y_t, Y_{t+1}] / \text{duración de } [Y_t, Y_{t+1}]}{\text{área de } j \text{ en el tiempo } Y_{t+1}} \right) * 100\% \quad (3)$$

$$L_{ti} = \left(\frac{\text{área de pérdida totales de } i \text{ en } [Y_t, Y_{t+1}] / \text{duración de } [Y_t, Y_{t+1}]}{\text{área de } i \text{ en el tiempo } Y_t} \right) * 100\% \quad (4)$$

De dicho cálculo es posible obtener las transiciones experimentadas por cada una de las categorías desde dos puntos de vista. El primero, R_{in} , son transiciones obtenidas por una categoría en específico desde el resto de las categorías estudiadas y, el segundo, Q_{mj} , son las transiciones que una categoría en específico da hacia otras.

$$R_{tin} = \left(\frac{\text{área de transición de } i \text{ a } n \text{ en } [Y_t, Y_{t+1}] / \text{duración de } [Y_t, Y_{t+1}]}{\text{área de } i \text{ en el tiempo } Y_t} \right) * 100\% \quad (5)$$

$$Q_{tmn} = \left(\frac{\text{área de transición de } m \text{ a } j \text{ en } [Y_t, Y_{t+1}] / \text{duración de } [Y_t, Y_{t+1}]}{\text{área de } j \text{ en el tiempo } Y_{t+1}} \right) * 100\% \quad (6)$$

A partir de las ganancias y las pérdidas es posible obtener la intensidad de las transiciones por medio de las ecuaciones 7 y 8, respectivamente, donde W_m y V_m proporcionan el valor uniforme de las transiciones de cada una de las categorías.

$$W_{tn} = \left(\frac{\text{área de ganancia total de } n \text{ en } [Y_t, Y_{t+1}] / \text{duración de } [Y_t, Y_{t+1}]}{\text{área que no es } n \text{ en el tiempo } Y_t} \right) * 100\% \quad (7)$$

$$V_{tm} = \left(\frac{\text{área de pérdida total de } m \text{ en } [Y_t, Y_{t+1}] / \text{duración de } [Y_t, Y_{t+1}]}{\text{área que no es } m \text{ en el tiempo } Y_t + 1} \right) * 100\% \quad (8)$$

RESULTADOS

DESCRIPCIÓN DE LOS CAMBIOS EN LOS USOS DEL SUELO

En primera instancia se obtuvieron los resultados del análisis de las matrices de tabulación cruzada considerando las 11 categorías de usos y coberturas de suelos localizados en ambos municipios. De dicho cálculo se puede observar que los usos de suelo más predominantes en el paisaje son la agricultura de riego ($\approx 35\%$), la selva baja caducifolia ($\approx 22\%$) y la agricultura de temporal ($\approx 17\%$). Asimismo, se observa una superficie importante de cuerpos de agua, correspondiente a 1 presa, 7 represas y 3 ríos con que cuenta el área de estudio, lo cual resalta la importancia agrícola de la región. Asimismo, aunque la superficie no es muy grande, las áreas urbanas ($\approx 3\%$) mantienen un incremento en el periodo de tiempo estudiado.

Con respecto a los cambios ocurridos de 1993 a 2011 de algunos de los usos y coberturas de suelo podemos señalar que la agricultura de riego mantuvo casi la misma superficie, pasando de 291,615 ha a 303,498 ha, mientras que la agricultura de temporal con una superficie de 148,618 ha., en 1993, aumentó a un total de 161,507 ha en 2011, teniendo así un crecimiento del 1.48%; los dos tipos de agriculturas cubren más de la mitad (53%) de la superficie del área de estudio. Por otro lado, se presentó una disminución considerable de la selva baja caducifolia pasando de 212,490 ha a 181,857 ha en el período estudiado, representando un déficit de más de 40,000 ha. Por su parte, el área urbana tuvo un incremento importante, aunque su superficie en ambos municipios no es la categoría más predominante, esta tuvo un incremento de 10,383 a 23,434 ha en el período de tiempo estudiado (tabla 1).

Por otra parte de los resultados obtenidos del método *Intensity Analysis*, se observó que los usos de suelo con mayores ganancias registradas son la agricultura de temporal y la selva baja espinosa; mientras que las categorías con más pérdidas durante el intervalo de tiempo estudiado son: la agricultura de temporal, la vegetación halófila y gipsófila, y la selva baja caducifolia. Si observamos el cambio total de las categorías en la tabla 1, podemos detectar que las que representan una mayor dinámica, obtenida de las ganancias y pérdidas, son la agricultura de temporal y la selva baja caducifolia.

Tabla 1. Superficies en hectáreas de cada uso de suelo.

Categorías	1993	%	2000	%	2011	%
Agricultura de riego	291,615.21	33.29	289,359.81	33.03	303,498.54	34.64
Agricultura de temporal	148,618.89	16.96	154,375.11	17.62	161,507.52	18.44
Área sin vegetación aparente	8,764.92	1.00	19,158.84	2.19	26,307.18	3.00
Área urbana	10,383.57	1.19	15,214.41	1.74	23,434.83	2.67
Bosque	27,162.90	3.10	28,322.28	3.23	28,366.74	3.24
Cuerpos de agua	65,973.60	7.53	63,201.96	7.21	65,193.84	7.44
Matorral	3,106.89	0.35	3,084.66	0.35	3,279.96	0.37
Selva baja caducifolia	212,490.72	24.25	196,026.30	22.38	181,857.78	20.76
Selva baja espinosa	21,045.69	2.40	31,323.96	3.58	20,267.28	2.31
Vegetación halófila y gipsófila	56,007.99	6.39	38,245.32	4.37	30,121.02	3.44
Vegetación hidrófila	30,906.54	3.53	37,764.27	4.31	32,242.23	3.68
Total	876,076.92	100.00	876,076.92	100.00	876,076.92	100.00

Fuente: elaboración propia.

Es importante resaltar que el incremento de las áreas urbanas, aun cuando en superficie no son representativas, la ganancia de 4,965.12 ha, representa la mitad de la superficie que tenían en 1993, año inicial del estudio. Asimismo, se puede observar un intercambio considerable de la categoría agricultura de riego de alrededor de 16,000 ha, de las cuales gran parte de su superficie se convirtió en área urbana (tabla 2).

Tabla 2. Indicadores de cambios en el periodo 1993-2000.

Categorías	Ganancias G_{ij}	Pérdidas L_{ti}	Intercambios S_i	Cambio neto	Cambio total
Agricultura de riego	8,077.86	10,333.26	16,155.72	2,255.40	18,411.12
Agricultura de temporal	20,913.39	15,157.17	30,314.34	5,756.22	36,070.56
Área sin vegetación aparente	12,184.02	1,790.10	3,580.20	10,393.92	13,974.12
Área urbana	4,898.16	67.32	134.64	4,830.84	4,965.48
Bosque	1,750.05	590.67	1,181.34	1,159.38	2,340.72
Cuerpos de agua	4,349.88	7,121.52	8,699.76	2,771.64	11,471.40
Matorral	345.42	367.65	690.84	22.23	713.07
Selva baja caducifolia	8,687.43	25,151.85	17,374.86	16,464.42	33,839.28
Selva baja espinosa	13,710.78	3,432.51	6,865.02	10,278.27	17,143.29
Vegetación halófila y gipsófila	4,090.77	21,853.44	8,181.54	17,762.67	25,944.21
Vegetación hidrófila	10,252.89	3,395.16	6,790.32	6,857.73	13,648.05
Total	89,260.65	89,260.65	99,968.58	78,552.72	178,521.30

Fuente: elaboración propia.

Para el periodo 2000 a 2011, la agricultura de temporal continuó como el uso de suelo con la mayor ganancia en ambos municipios, aunque es la segunda categoría con mayores pérdidas registradas. Es importante observar que la agricultura de riego para este periodo tuvo considerables ganancias (24,462.72 ha) y básicamente las mismas pérdidas ($\approx 10,300$ ha) que en el periodo anterior. Por su parte, el área urbana durante este periodo duplicó su ganancia, registrando un total de 8,288.73 ha, las cuales fueron obtenidas principalmente de agricultura de riego (tabla 3).

Tabla 3. Indicadores de cambios en el periodo 2000-2011.

Categorías	Ganancias G_{ij}	Pérdidas L_{ii}	Intercambios S_i	Cambio neto	Cambio total
Agricultura de riego	24,462.72	10,323.99	20,647.98	14,138.73	34,786.71
Agricultura de temporal	33,722.64	26,590.23	53,180.46	7,132.41	60,312.87
Área sin vegetación aparente	11,201.31	4,052.97	8,105.94	7,148.34	15,254.28
Área urbana	8,288.73	68.31	136.62	8,220.42	8,357.04
Bosque	840.06	795.60	1,591.20	44.46	1,635.66
Cuerpos de agua	5,107.41	3,115.53	6,231.06	1,991.88	8,222.94
Matorral	626.67	431.37	862.74	195.30	1,058.04
Selva baja caducifolia	13,456.89	27,625.41	26,913.78	14,168.52	41,082.30
Selva baja espinosa	2,629.35	13,686.03	5,258.70	11,056.68	16,315.38
Vegetación halófila y gipsófila	6,642.63	14,766.93	13,285.26	8,124.30	21,409.56
Vegetación hidrófila	4,335.57	9,857.61	8,671.14	5,522.04	14,193.18
Total	111,313.98	111,313.98	144,884.88	77,743.08	222,627.96

Fuente: elaboración propia.

En cuanto al análisis de intensidad (ecuación 1), se observó que el periodo con mayor número de cambios anuales en los usos de suelo fue el segundo (2000-2011), pero la intensidad a la que se dieron estos cambios es mayor en el primer periodo, sobrepasando el valor de la intensidad uniforme de 1.28%.

Por otro lado, la agricultura de riego aumentó en estos municipios debido a la habilitación de tierras al sistema de riego, de igual manera se incrementó la agricultura de temporal en la parte del pie de sierra del municipio de Culiacán, impactando negativamente en la destrucción de hábitat, la pérdida de biodiversidad y la erosión de los suelos, e impactando positivamente en la economía del Estado y de estos municipios, a través de la producción agrícola mediante medios altamente tecnificados.

Asimismo, las pérdidas de agricultura de riego y selva son ocasionados principalmente por el crecimiento de las áreas urbanas, esto bajo un proceso inicial de abandono de tierras agrícolas en

torno a las principales Ciudades de ambos Municipios, como son: Culiacán, Navolato, Costa Rica, El Dorado y Villa Juárez. En el caso particular de la pérdida de selva baja caducifolia se observa que se da debido a la preparación de tierra para la agricultura de temporal y el cultivo de pasturas en la zona serrana del municipio de Culiacán.

DESCRIPCIÓN DE LOS CAMBIOS EN LAS ÁREAS URBANAS

Analizando más detalladamente el crecimiento de las áreas urbanas en los municipios de Culiacán y Navolato, se observó que en el año de 1993 se tenían registradas un poco más de 10,000 ha, las cuales fueron en aumento para el año 2000 con una superficie de 15,000 ha, y para el año 2011 la dinámica continua de crecimiento hizo que esta categoría sobrepasara las 20,000 ha en ambos municipios. En este caso la mayor intensidad a la que se dieron estos cambios fue mayor en el primer periodo.

Por otro lado, en ambos periodos de estudio, las principales contribuciones al incremento del área urbana provienen en su mayoría de la agricultura de riego, y en menor término de la agricultura de temporal, selva baja caducifolia y selva baja espinosa, teniendo esta categoría su máxima evolución en las zonas contiguas a la ciudad de Culiacán y en menor medida en la ciudad de Navolato y localidades de ambos municipios. Finalmente se dieron un total de 4,898.16 ha de transiciones con una tasa anual de 701 ha entre 1993 y 2000, mientras que en el segundo periodo (2000 – 2011), se incrementaron las transiciones hasta las 8,288.73 ha con una tasa anual de 753 ha (tabla 4).

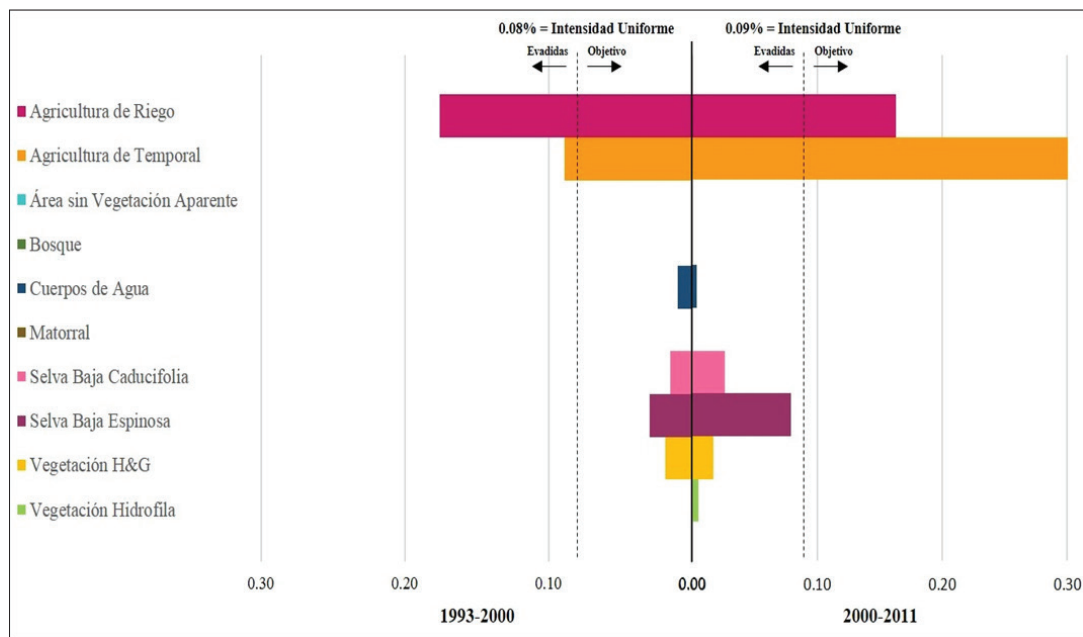
Tabla 4. Transiciones registradas para el área urbana en ambos periodos.

Transiciones PARA	Área Urbana			
	1993-2000		2000-2011	
	Total	Anual	Total	Anual
Agricultura de riego	3,582.45	512	5,195.16	472
Agricultura de temporal	921.51	132	2,128.41	193
Área sin vegetación aparente	0.00	0	0.00	0
Bosque	0.00	0	0.00	0
Cuerpos de agua	45.63	7	27.09	2
Matorral	0.00	0	0.00	0
Selva baja caducifolia	230.58	33	569.52	52
Selva baja espinosa	44.10	6	273.78	25
Vegetación halófila y gipsófila	73.89	11	72.36	7
Vegetación hidrófila	0.00	0	22.41	2
Total	4,898.16	701.00	8,288.73	753.00

Fuente: elaboración propia

La contribución hacia los asentamientos urbanos derivados de la Intensidad Uniforme (figura 3) mantiene prácticamente el mismo ritmo (0.08 y 0.09) en ambos periodos de estudio. No obstante, se puede observar que solamente las agriculturas mantienen una contribución significativa hacia los asentamientos urbanos del territorio. En este sentido, la agricultura de riego supera con mucho la intensidad uniforme anual de cambio, mientras que la agricultura de temporal presenta una mayor intensidad en el segundo periodo de estudio. Este proceso suburbano se da debido al abandono de tierras agrícolas de riego, las cuales pasan a catalogarse como de temporal y hasta el último periodo aparecen como áreas urbanas entorno de las Ciudades.

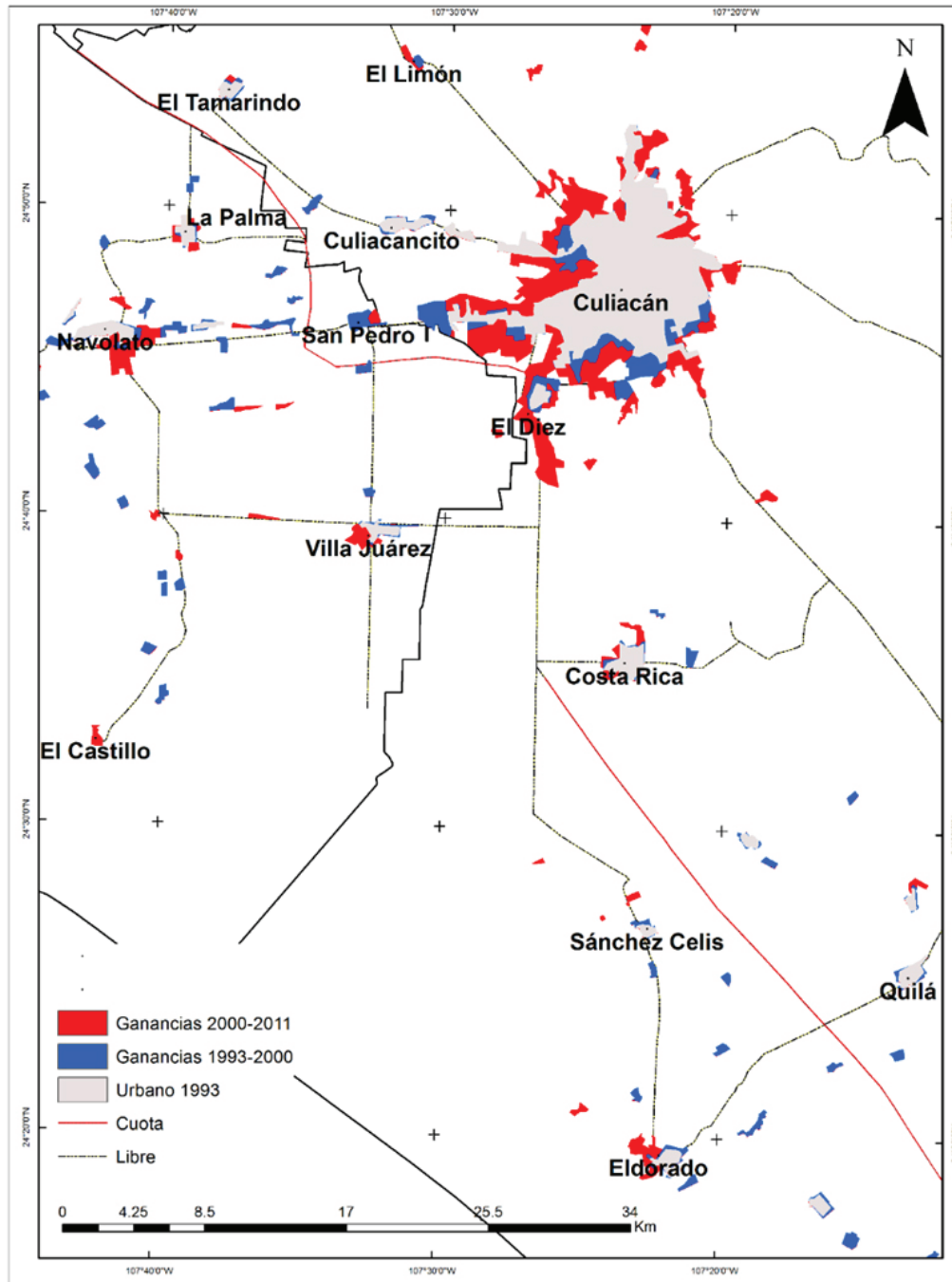
Figura 3. Intensidad de transiciones para área urbana en ambos periodos.



Fuente: elaboración propia.

Desde el punto espacial podemos observar que el crecimiento urbano prolifera principalmente de manera agregada a las zonas urbanas existentes en 1993, en menor medida en el periodo 1993-2000 y con mayor intensidad en el periodo 2000-2011 (figura 4). Estudios recientes proponen que la dinámica urbana derivada en ambos municipios se conforme entorno a un área metropolitana que sea producida por el desarrollo económico de las Ciudades Capitales y la dinámica agrícola e industrial de las principales localidades de ambos municipios. En caso de concretarse lo anterior, la nueva área metropolitana elevará su población a más de 1, 000,000 de habitantes que representarían el 35.92% de la población sinaloense, con 7,043 km² de superficie además de diferentes localidades urbanas y rurales de ambos municipios (IMPLAN, 2015).

Figura 4. Crecimiento urbano en las ciudades de los Municipios de Culiacán y Navolato.



Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Del análisis de los cambios de uso de suelo y vegetación se determinó la factibilidad de aplicar la metodología de Pontius y Aldwaik (2007), ya que esta permitió determinar las ganancias, pérdidas y transiciones, y también su intensidad en tres niveles (periodos, categoría y transiciones), lo cual a la luz de los resultados obtenidos, aclara y da nuevos datos sobre la dinámica espacio-temporal en los municipios de Culiacán y Navolato, en el estado de Sinaloa.

Por otro lado, se pudo precisar de manera cuantitativa y espacial la vocación agrícola del área de estudio, pero también, los procesos desordenados bajo los cuales se tiene inmerso al territorio, lo cual ocasiona daños al medio ambiente y a la biodiversidad. Asimismo, es relevante la dinámica urbana en las últimas dos décadas, la cual ha ocasionado el abandono de tierras agrícolas y la pérdida de selva baja en las cercanías de las áreas urbanas consolidadas para su posterior inclusión como áreas urbanizables, sin contar con políticas sustentables de desarrollo urbano y territorial a corto y mediano plazo. Cabe destacar que este proceso data de la década de los noventa cuando se produjo el Programa de Cesión de Derechos Agrarios y donde los ejidatarios estuvieron en posibilidad de vender su parcela a particulares. Cabe destacar que en algunos casos la venta y urbanización de la tierra se lleva a cabo a nivel del ejido, donde actualmente se asientan zonas residenciales de alto nivel económico. Definitivamente el impacto de este proceso ocasiona sellamiento de suelo, aumento de la temperatura en la ciudad, pérdida de biodiversidad en las áreas donde había selva baja o vegetación hidrófila y donde hoy existen desarrollos residenciales y comerciales.

Finalmente, es importante destacar la importancia de generar cartografía de usos de suelo y vegetación de mayor precisión y alcance, en la cual no solo se definan las coberturas sino los usos a los que se destina el suelo. Esto nos dará la posibilidad de estudiar en mayor profundidad la dinámica e intensidad del crecimiento urbano, así como proponer modelos de simulación de futuros crecimiento metropolitano en la región.

AGRADECIMIENTOS

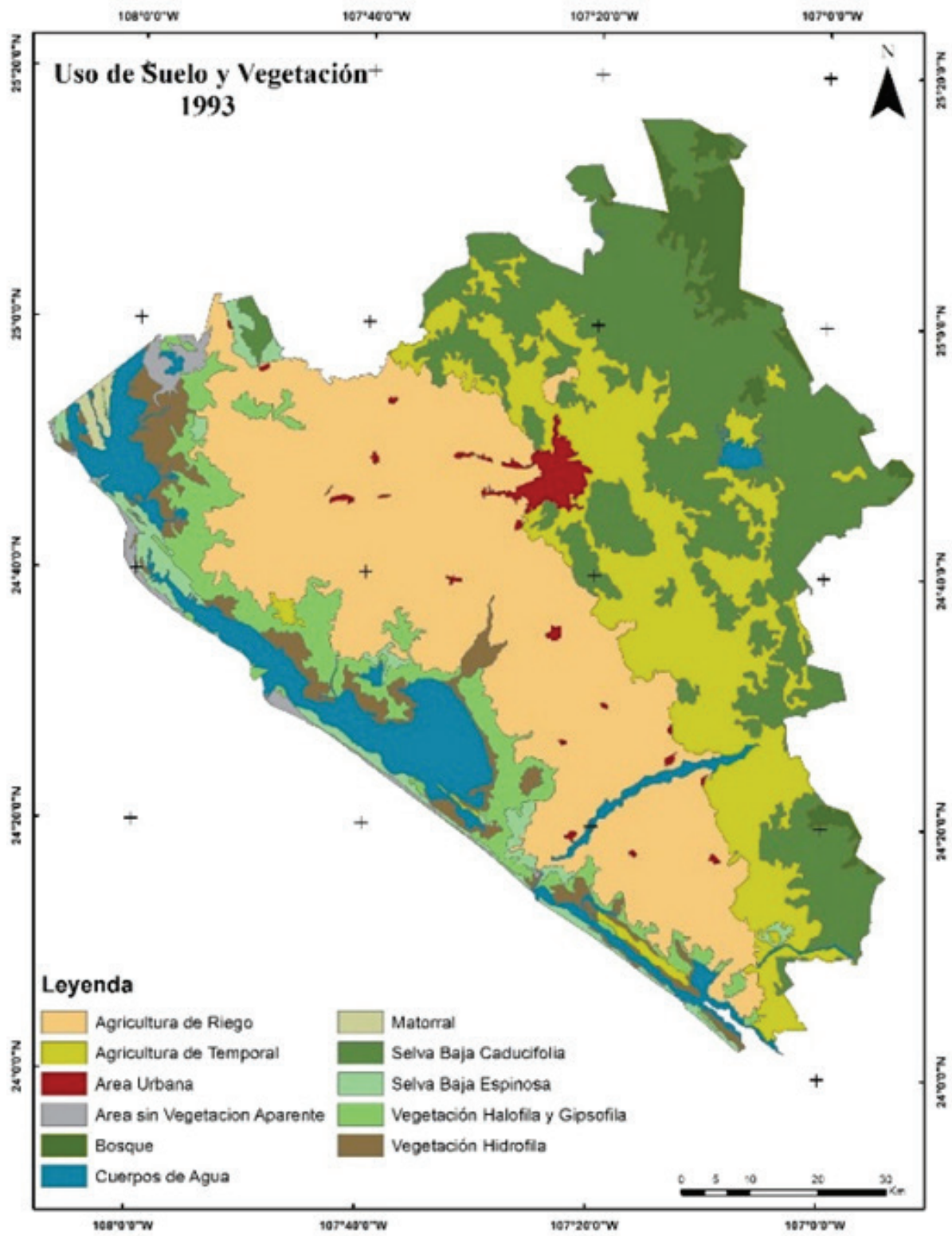
Se agradece el apoyo financiero recibido para la realización de este trabajo de investigación a la Universidad Autónoma de Sinaloa a través de la Dirección General de Investigación y Posgrado en la Convocatoria del Programa de Fomento y Apoyo a Proyectos de Investigación (PROFAPI 2012).

REFERENCIAS

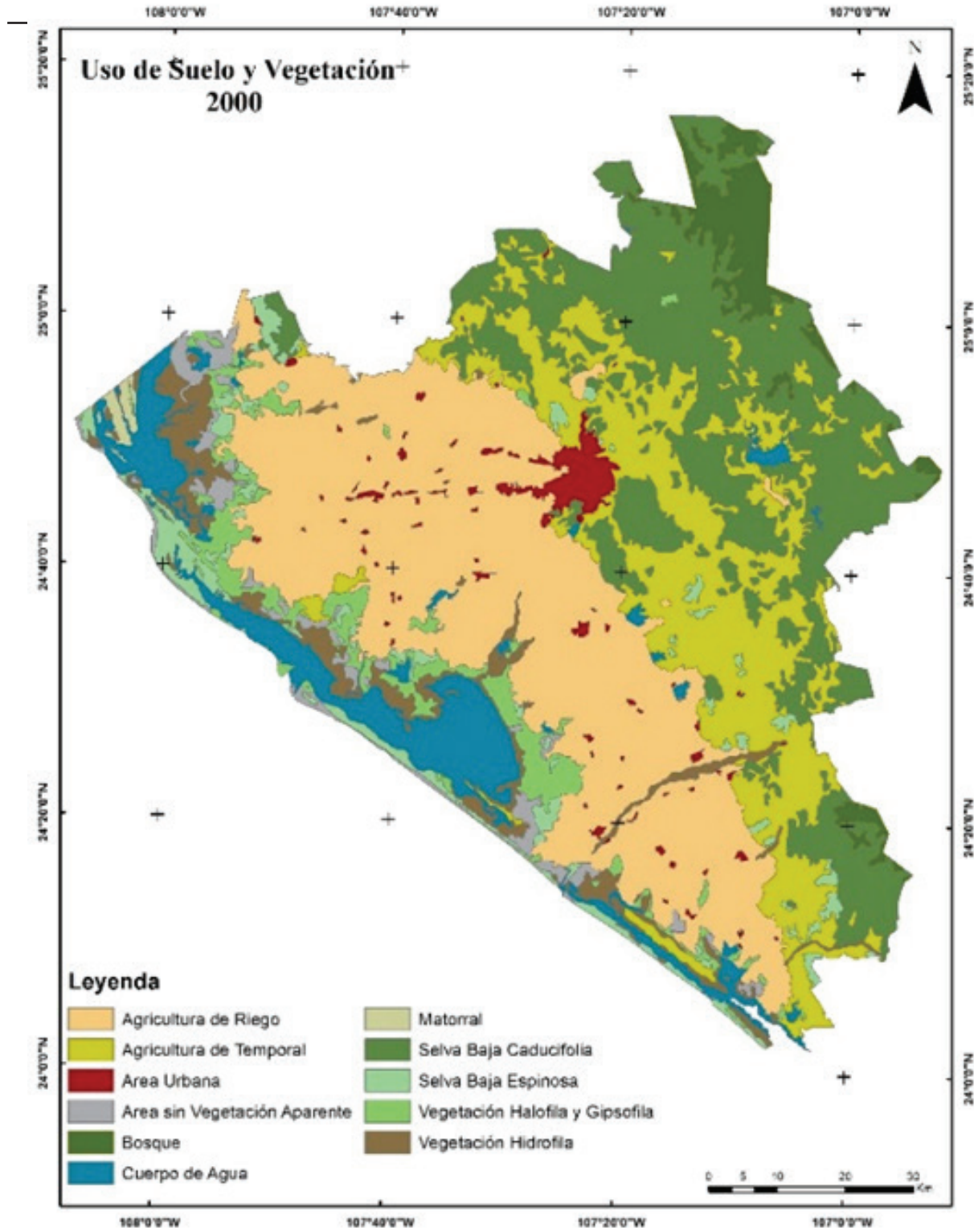
- Aldwaik, S. Z., & Pontius Jr., R. G. (2012). Intensity analysis to unify measurements of size and stationarity of land changes by interval, category, and transition. *Landscape and Urban Planning* (106), 103-114.
- Corrales, G. (2013). *Análisis de cambio de uso de suelo para el estado de Sinaloa, utilizando Sistemas de Información Geográfica* (Tesis de licenciatura). UAS, Sinaloa, México.
- FAO (2010). *Global Forest Resources Assessment 2010. Main Report*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization, United Nations.
- Groombridge, B., & Jenkins, M. D. (2000). *Global biodiversity: Earth's living resources in the 21st century*. Cambridge: The World Conservation Press.
- IMPLAN (2015). *Zonas conurbada Culiacán - Navolato*. Recuperado de <http://www.implanculiacan.gob.mx/index.php/centroinformacion/estudios-y-otros-instrumentos-de-planeacion/41-zona-conurbada-culiacan-navolato>
- INEGI (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/>
- Pineda, N. (2010). *Descripción, análisis y simulación de procesos forestales en el Estado de México mediante Tecnologías de la Información Geográfica* (Tesis doctoral). Universidad Alcalá de Henares, Madrid.
- Plata, W., Gómez, M., & Bosque, J. (2009). Análisis de los cambios del uso del suelo ocurridos en la Comunidad de Madrid en el periodo de 1987 a 2000. *Scripta Nova*, 13 (293). Recuperado de <http://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-293.htm>
- Pontius, R. G., & Aldwaik, S. Z. (2004). *Intensity Analysis*. Recuperado de <https://sites.google.com/site/intensityanalysis/about>
- Pontius, R. G., & Aldwaik, S. Z. (2007). *Intensity Analysis*. Recuperado de <https://sites.google.com/site/intensityanalysis/home>
- Roldán, H. (2006). *La urbanización metropolitana de Culiacán*. México: Fontamara.
- Turner, B., & Meyer, W. (1994). *Changes in land use and land cover: A global perspective*. Cambridge: Cambridge University Press.

ANEXO A

Anexo A-1. Uso de suelo y vegetación 1993.

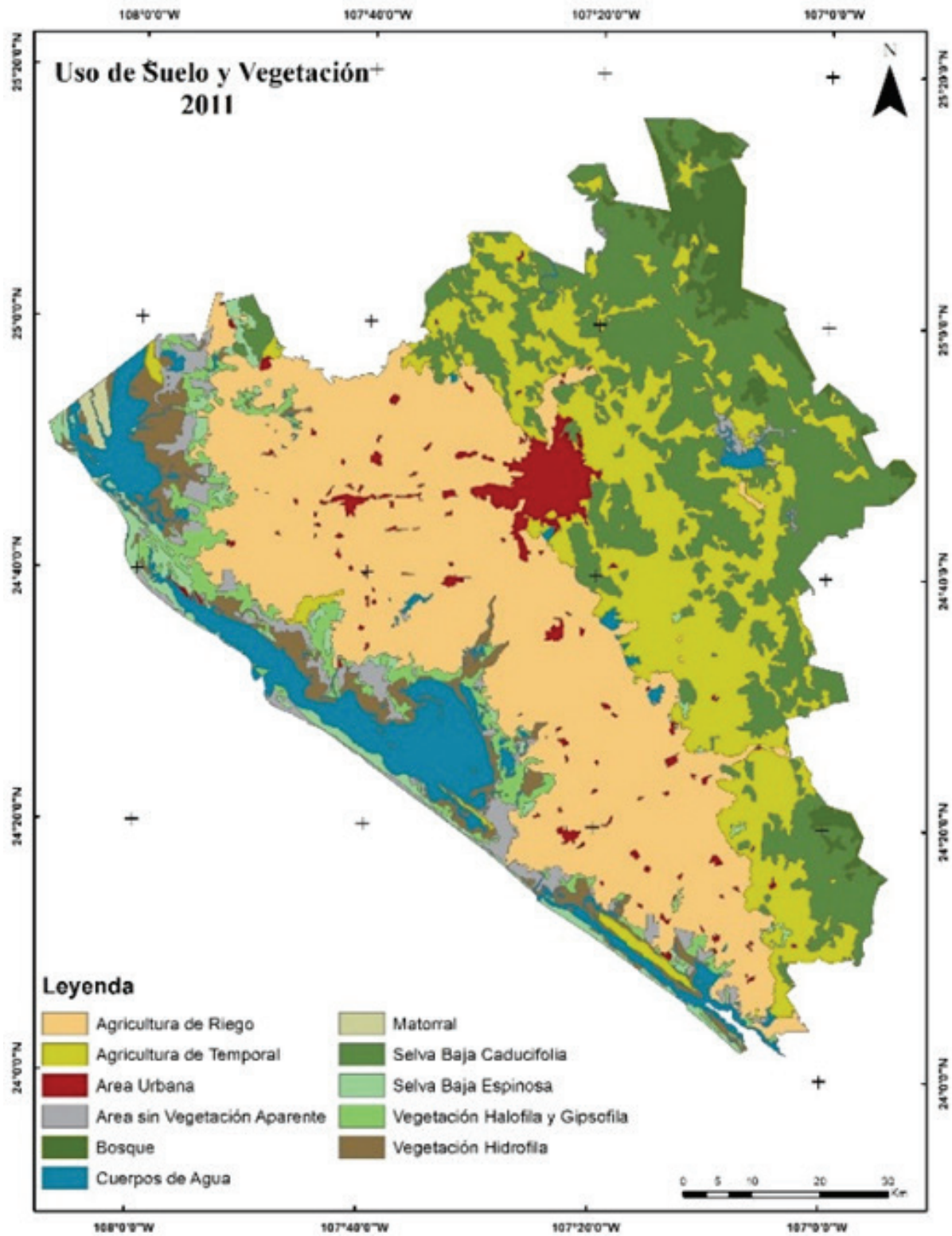


Fuente: Instituto Nacional de Ecología (INE).



Fuente: INEGI e Instituto de Geografía de la UNAM (IG).

Anexo A-3. Uso de suelo y vegetación 2011.



Fuente: elaboración propia.

SIMULACIÓN DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN LA CIUDAD DE ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO

Carlos Iván Salinas Espinosa, Bernardino Ricardo Eaton González,
Martha Ileana Espejel Carbajal y Claudia Leyva Aguilera*

INTRODUCCIÓN

En años recientes ha crecido el interés por incorporar modelos de simulación espacialmente explícitos en el desarrollo de las políticas de planeación. Estos modelos son utilizados para modelar las dinámicas del paisaje, resultan herramientas útiles para entender la complejidad de ciertos procesos, y son aplicables a problemas de manejo y conservación (Turner et al., 1995). El modelo es una representación simplificada de la realidad que ayuda a percibir la complejidad de los sistemas naturales y urbanos a partir de ecuaciones matemáticas (Villa-Vialaneix, Follador, Ratto, & Leip, 2012).

Los modelos de simulación espacialmente explícitos son utilizados para probar supuestos sobre la evolución del paisaje bajo diversos escenarios sociales, económicos, políticos y ambientales. El resultado del modelo ayuda a seleccionar una estrategia adecuada de manejo del paisaje porque confronta resultados y escenarios alternativos con la realidad. Estos modelos, tecnológicamente son más complejos y se clasifican en varias categorías, según su finalidad y el principio mediante el cual trabajan (Soares-Filho & Coutinho, 2002).

Actualmente, se ha desarrollado una gran variedad de modelos que permiten entender el papel del uso del suelo presente y los usos que se proyectan en escenarios futuros, tanto tendenciales como

* Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias, isalinas@uabc.edu.mx, eaton@uabc.edu.mx, ileana.espejel@uabc.edu.mx y cleyva@uabc.edu.mx

alternativos. Para ello, se utilizan los usos del suelo pasado y presente en una distribución espacial de los elementos y se estima el potencial de cambio de uso del suelo (CUS) en función de un sistema de variables explicativas (Veldkamp & Lambin, 2001). Las ventajas de los modelos CUS son: 1) la proyección de la localización de sitios propensos al cambio, 2) un mejor entendimiento de la relación entre cambio y causas, 3) el modelo proporciona información relevante en el manejo de recursos a corto, mediano y largo plazo y, 4) resulta una herramienta de apoyo para las políticas ambientales (Aguilera, 2006; Lambin, 1994).

Estos modelos son populares por su fácil manejo y su capacidad para describir dinámicas que reproducen los procesos comunes de cambio. Además, reproducen fenómenos complejos, dinámicas no lineales y simulan algunos procesos de cambio (Aguilera, 2006). Los patrones históricos de CUS ayudan a proyectar la posible degradación en la diversidad biológica de un territorio, ya que el CUS, particularmente la deforestación, entendida como la pérdida de vegetación natural, tiene una serie de implicaciones que afectan directa e indirectamente a esta diversidad; por ejemplo, la pérdida de hábitat, el aislamiento de poblaciones producto de la fragmentación, la reducción del tamaño mínimo de parche de un hábitat continuo, el arribo y establecimiento de especies exóticas, entre otras (Arriaga, 2009; Mas, Pérez-Vega, & Clarke, 2012; Trombulak & Frissell, 2000).

México es conocido por su alta diversidad biológica, es considerado uno de los países mega diversos junto con Brasil, Colombia e Indonesia (Ceballos, Arroyo, Rodrigo & Yolanda, 2005; Rodríguez, Soberón, & Arita, 2003; Rusell & Goettsch, 1992). Esta diversidad se encuentra en constante amenaza, principalmente por la deforestación. Las cifras más recientes indican que México pierde alrededor de 274 mil hectáreas anuales de cobertura natural (Conafor, 2012; FAO, 2010). La deforestación ha ocasionado un aumento en las tasas de extinción de especies en el mundo, equiparables a las que se presentaron en la última glaciación (Dirzo & Raven, 2008; Wake & Vredenburg, 2008).

El estado de Baja California, en comparación con el resto del país, se distingue por una baja presión antrópica hacia los recursos naturales que se presenta principalmente en el norte del estado, donde los límites de las ciudades (Tijuana, Mexicali y Ensenada) se han incrementado de manera considerable en los últimos años (Farley, Ojeda-Revah, Atkinson, & Eaton-González, 2012; Ojeda-Revah, Bocco, Ezcurra, & Espejel, 2007; Ojeda-Revah, 2007; Rosete, Pérez, & Bocco, 2008; Rosete, Velázquez, Bocco, & Espejel, 2013; Salinas-Espinosa, Leyva, & Eaton, 2013).

De continuar con las tendencias de crecimiento de las ciudades y la tendencia a la deforestación, en los siguientes años se eliminarán grandes e importantes zonas de vegetación donde se encuentra el matorral costero, el chaparral y las dunas costeras, las cuales contienen una gran cantidad de endemismos (Riemann & Ezcurra, 2007). Además, de manera particular, esta biodiversidad proporciona servicios ambientales como la retención de suelos, la captura de carbono y el control

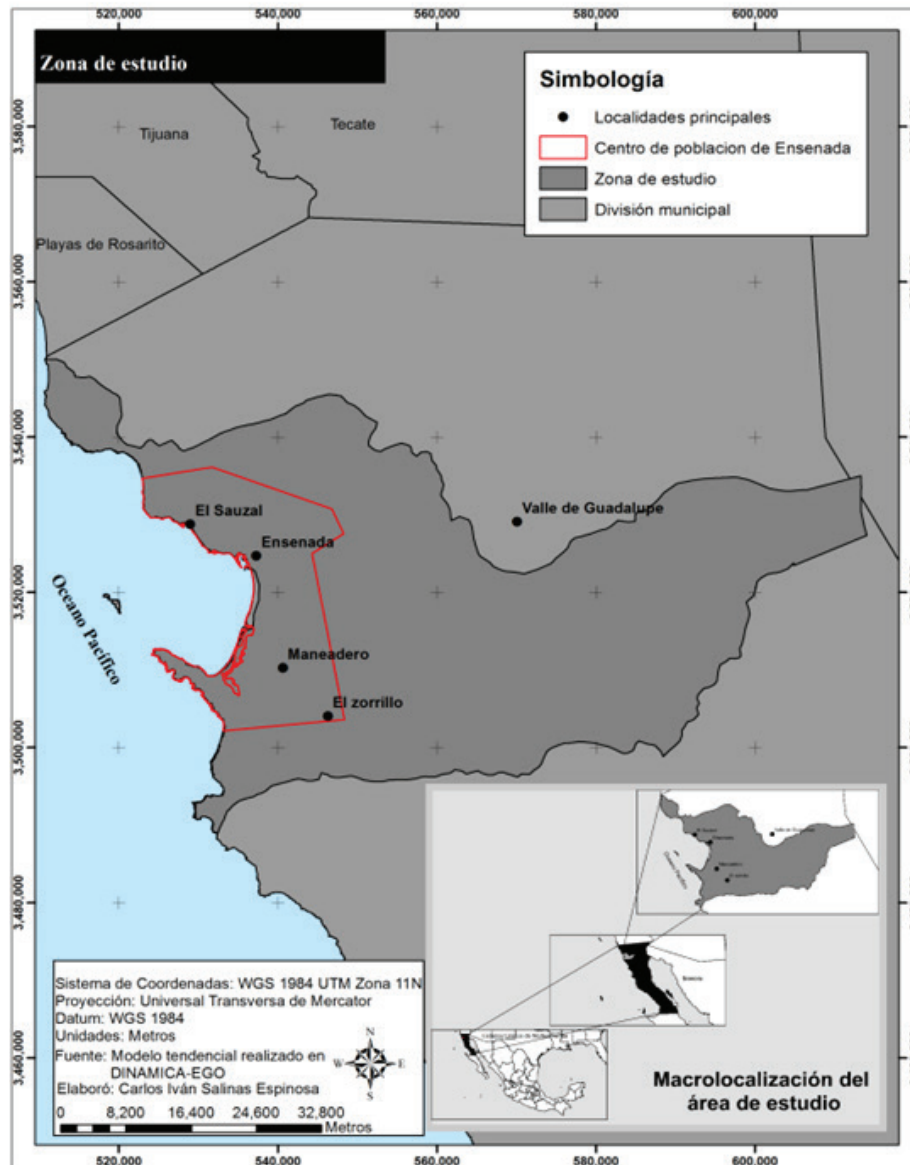
de la erosión (González-Botello & Bullock, 2012).

El objetivo de este trabajo es implementar un modelo proyectivo de cambio de uso del suelo para evaluar la deforestación, así como sus probables trayectorias hacia el futuro en la cuenca donde se localiza el centro de población de Ensenada, Baja California.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio tiene una superficie de 267,000 ha, incluye al centro de población de la ciudad de Ensenada y la cuenca que lo rodea (figura 1).

Figura 1. Zona de estudio.



Fuente: elaboración propia a partir de Conabio (2001).

El 25% del área de estudio (subcuenca), corresponde a la superficie del centro de población. Esta zona cuenta con un intervalo altitudinal de los 0 hasta los 1880 msnm. El área se compone de llanuras costeras y aluviales. El tipo de clima es mediterráneo (Dallman, 1998) y se caracteriza por veranos secos y calientes, e inviernos húmedos, lluviosos y fríos. La temperatura media es 17.8°C; la precipitación media anual es 262.7 milímetros, y humedad relativa de 43.9% a 69.8%.

La flora es característica de la provincia florística de California (Oberbauer, 1999) compuesta por matorral rosetófilo costero, chaparral, dunas de arena, vegetación riparia y bosque de pino (Pase & Brown, 1982). El matorral rosetófilo costero y el chaparral predominan y se caracterizan por arbustos de 0.50 a 1.50 m que permanecen sin hojas la mayor parte del año, a excepción de los meses donde hay mayor humedad, que es cuando la mayoría de las plantas de este tipo de vegetación florecen (Espejel et al., 2001).

METODOLOGÍA

La investigación consistió en dos fases: 1) la interpretación y detección del cambio y 2) la elaboración del modelo tendencial de deforestación.

DATOS

En este trabajo se utilizó la información de cobertura y uso del suelo para los años 1993 y 2009 para elaborar el modelo, y la del año 2012 para la fase de validación del modelo. Esta información de cobertura y uso del suelo se obtuvo de las cartas de uso de suelo y vegetación de INEGI serie II-1993, serie IV-2009 y serie V-2012 (INEGI, 2013). Como variables explicativas se utilizaron: la distancia a arroyos, distancia a carreteras, altitud, pendiente, distancia a la línea de costa y distancia a localidades urbanas (mayores a 2500 habitantes). Estas son las variables espaciales que comúnmente son consideradas como promotoras del cambio en la cobertura y uso del suelo (Geist & Lambin, 2001; Geist & Lambin, 2002).

En este trabajo se consideraron ocho clases de cobertura y uso del suelo: agricultura (1), asentamientos humanos (2), bosque de pino (3), chaparral (4), cuerpo de agua artificial (5), dunas costeras (6), matorral costero (7) y vegetación riparia (8), las cuales fueron denominadas con base en el conocimiento de la zona, modificando la clase original publicada por INEGI (tabla 1).

Para el análisis del CUS en los tres tiempos, se utilizó la metodología de Bocco, Mendoza, y Maser (2001), en la cual se sobreponen cartográficamente las capas de información y se comparan la extensión y el cambio de cada cobertura.

Tabla 1. Etiqueta original series de INEGI y equivalencia en el presente estudio.

Etiqueta original de INEGI	Etiqueta definida para este estudio
Agrícola-Pecuaria- Forestal	Agricultura y pastizal
Asentamientos humanos	Asentamientos humanos
Bosque de encino	Ripario
Bosque de pino	Bosque de pino
Chaparral	Chaparral
Cuerpo de agua	Cuerpo de agua
Matorral rosetófilo costero	Matorral costero
Pastizal cultivado	Agricultura y pastizal
Pastizal halófilo	Agricultura y pastizal
Pastizal inducido	Agricultura y pastizal
Riego	Agricultura y pastizal
Temporal	Agricultura y pastizal
Tular	Marisma
Vegetación de dunas costeras	Dunas costeras
Vegetación de galería	Ripario
Zona urbana	Asentamientos humanos

Fuente: elaboración propia a partir de INEGI (2013).

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO TENDENCIAL

Para el modelado de las trayectorias de deforestación del CUS, se utilizó el software DINAMICA-EGO (Soares-Filho, Rodrigues, & Follador, 2013). Este software considera los patrones espaciales y temporales vinculados a los procesos de cambio a través del tiempo, tomando en cuenta no solo las clases o categorías de cobertura y uso del suelo, sino también variables explicativas sobre el entorno de la zona de estudio. Los tres algoritmos principales del modelo implementados en DINAMICA-EGO son las matrices de transición, los autómatas celulares y los pesos de evidencia.

En este sentido DINAMICA-EGO genera modelos híbridos, más complejos y por lo tanto, modelos más completos. Este *software* ha sido utilizado en diferentes trabajos en los cuales se elaboran modelos de simulación del CUS para deforestación (Maeda et al., 2011; Mas & Flamenco, 2011; Merry, Soares-Filho, Nepstad, Amacher, & Rodrigues, 2009; Soares-Filho et al., 2006) para crecimiento urbano (Almeida, Batty, Miguel, Monteiro, & Ca, 2003; Almeida, Gleriani, Castejon, & Soares-Filho, 2008; Almeida, 2004; Maeda et al., 2011) así como para crecimiento agrícola.

Para la implementación y uso de un modelo es indispensable considerar las ventajas que se obtienen al desarrollarlo, las partes que lo conforman (variables dinámicas y variables estáticas) y las tres fases de implementación: calibración, simulación y validación (Jorgensen & Bendoricchio,

2001). Las ventajas más sobresalientes del modelado en DINAMICA-EGO son las siguientes: la mayoría de los operadores se presentan en un sistema de información geográfica, permite el desarrollo de modelos sofisticados y usa tanto modelos basados en tendencias observadas como modelos basados en conocimiento experto (Mas, Kolb, Paegelow, Camacho, & Houet, 2014).

CALIBRACIÓN

En esta primera fase se calibra el modelo principalmente respondiendo a dos preguntas: ¿cuánto cambia? y ¿cuáles son los probables cambios de acuerdo con las variables explicativas? El primer paso para la calibración consiste en calcular la probabilidad de cambio, mediante las matrices de transición. Para esto, se realizó un cruce de la información de uso de suelo de los años 1993 y 2009, y se generaron dos tipos de matrices, la matriz simple, y una matriz anual para los 16 años del periodo 1993-2009 en estudio.

El siguiente paso para la calibración es el cálculo de los pesos de evidencia, los cuales se consiguen a partir de los rangos que permiten categorizar las variables continuas. Para mejorar el resultado de los pesos de evidencia, es necesario que las variables utilizadas sean espacialmente independientes. Consecuentemente, para verificar que no existía dependencia entre las variables y eliminar aquellas que no cumplían con esta norma, se calculó el Índice de Cramer (Almeida, 2004; Bonham-Carter, 1994; Soares-Filho, Rodrigues, & Costa, 2009), utilizando solo las variables con valor superior a 0.35 y eliminando las variables restantes. Con el cálculo de los pesos de evidencia, se obtiene la probabilidad condicional, es decir, la probabilidad de ocurrencia de las transiciones con o sin presencia de las variables que expresan los cambios. Lo anterior identifica los sitios con mayor probabilidad de cambio para cada transición y a partir de ello se obtiene un mapa de probabilidad de cambio.

SIMULACIÓN

En esta fase se utilizaron las funciones *patcher* y *expander* del programa DINAMICA-EGO, ambas simulan mediante autómatas celulares, los cambios en cada paso de tiempo (anual). La función *patcher* crea nuevos fragmentos generados en la simulación del cambio y la función *expander* simula los cambios por expansión o contracción de los fragmentos ya existentes y de distintas clases. El resultado es un mapa tendencial del uso del suelo según el periodo estudiado (tabla 2). En este caso, al ser comparados dos años (1993 y 2009), se modeló hacia el futuro el mismo periodo, y el mapa final consta de 16 mapas anuales (de 2009 a 2025).

El mapa de tendencias, obtenido en la calibración, da lugar a la fase de simulación, es decir, la construcción de escenarios hipotéticos de la superficie que podría ser transformada en el futuro. Esto se hace mediante la reclasificación de las áreas susceptibles al cambio en nuevas categorías

de cobertura y uso del suelo. En esta fase es necesario definir el porcentaje de transiciones a ejecutar por cada función y especificar los parámetros representados por la media y la varianza de los tamaños e isometría de los fragmentos que se formen o expandan en los períodos analizados. Es posible controlar el tamaño promedio, la varianza y la isometría de los fragmentos, así como su distribución respecto al mapa de probabilidad. Esto ayuda a que un mapa se proyecte de manera más realista (Mas et al., 2012).

Tabla 2. Criterios utilizados en *patcher* y *expander*.

Año	1993	2009	Tamaño promedio del parche (ha)	Varianza del tamaño de parche (ha)	Isometría del parche
Transición	Agricultura	Asentamientos humanos	20	20	1
	Chaparral	Agricultura	40	40	1
	Dunas costeras	Asentamientos humanos	1	1	1
	Matorral costero	Asentamientos humanos	10	10	1
	Ripario	Agricultura	1	1	1
	Ripario	Asentamientos humanos	1	1	1

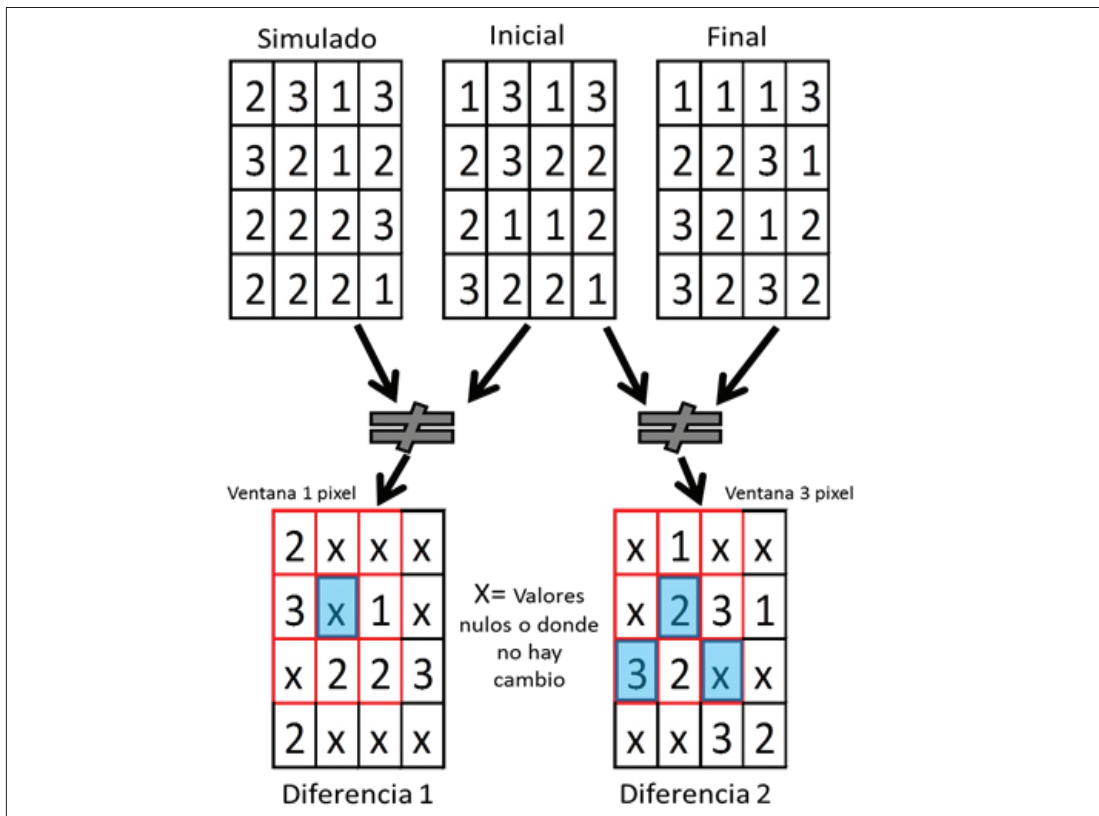
Fuente: elaboración propia.

VALIDACIÓN

Existen diversos tipos de validación para esta clase de modelos: las validaciones hechas pixel a pixel, como es el caso del estadístico de Kappa, la validación ROC, el cálculo del índice de diferencia de potencial de cambio (DPC), y la validación *fuzzy* que implementa DINAMICA-EGO (Mas, Filho, Pontius, Gutiérrez, & Rodrigues, 2013; Merry et al., 2009; Pontius, Huffaker, & Denman, 2004).

Para evaluar la coincidencia espacial entre los cambios simulados y un mapa real, se utilizó la validación *fuzzy*. Esta prueba está basada en el concepto de localización difusa, en la cual un pixel es evaluado no solo en función de sí mismo, sino por los pixeles vecinos, por lo que se trata de una validación compleja, en la cual además de evaluar pixel a pixel analiza los pixeles vecinos a manera de ventanas de diferentes tamaños (Hagen, 2003). Esta validación se normaliza entre los tres mapas (inicial, final y simulado), se valoran solo los cambios (no el mapa completo) y se genera una matriz de pixeles que son evaluados en varias iteraciones (Soares-Filho et al., 2009). El mapa se evalúa varias veces aplicando una distancia de tolerancia *fuzzy* cada vez mayor a través de una ventana cuyo tamaño aumenta (figura 2).

Figura 2. Esquema sobre la validación de los escenarios (mapas) en DINAMICA.



Fuente: Modificado de Soares-Filho et al. (2009)

Para realizar la validación del modelo elaborado, se utilizaron tres mapas de cobertura y uso del suelo: el de 1993 (inicial), el de 2012 (final) y el de 2012 (simulado), por lo que se realizó una primera simulación desde el año 2009 hasta el 2012; posteriormente si se obtenían valores de similaridad con buena calidad (superior a 0.80), se realizaba la simulación desde el año de mapa de partida 2012. Una vez que se obtuvo un modelo de calidad se calcularon las áreas para los tres periodos de tiempo, y se realizó un análisis del cambio probable para el año 2025. No se modificaron los pesos de evidencia, y se apegó a los criterios estadísticos descritos anteriormente.

RESULTADOS

PRINCIPALES CAMBIOS ENTRE 1993 Y 2009

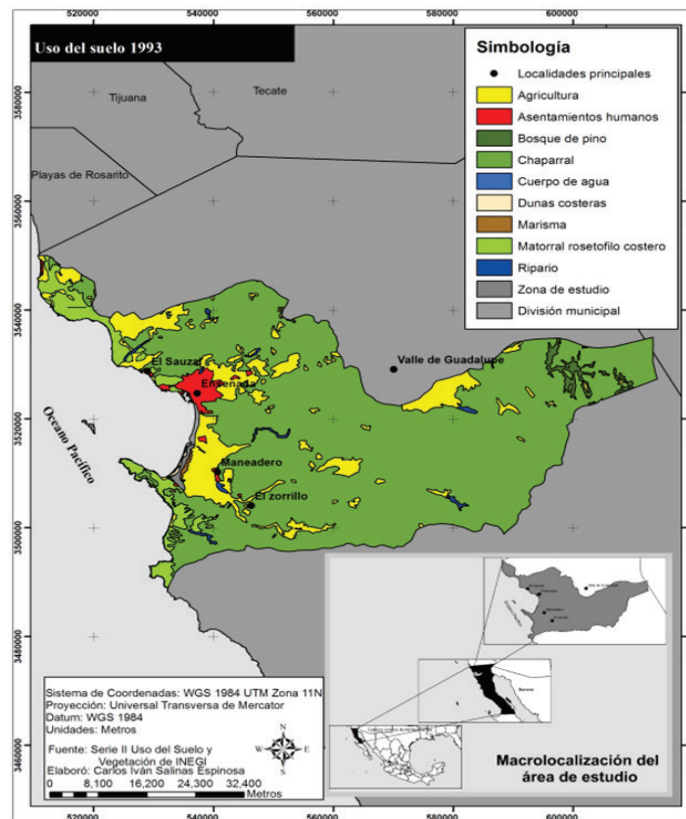
Los principales cambios en superficie por cobertura se muestran en la tabla 3, la única categoría de cobertura y uso del suelo que se mantuvo fue el cuerpo de agua, mientras que el bosque de pino disminuyó su extensión en solo cuatro hectáreas. Para 2009, las únicas coberturas que aumentaron fueron los asentamientos humanos y la agricultura, las restantes disminuyeron su extensión respecto al 1993 (ver figuras 3 y 4).

Tabla 3. Cambios en extensión por categoría de cobertura y uso del suelo en los periodos de estudio.

Categoría de cobertura y uso del suelo	Extensión	Extensión	Extensión	Extensión	Estatus
	1993	2009	1993	2009	
	Porcentaje		Hectáreas		
Chaparral	79.58	77.79	212776	207982	Disminuye
Agricultura	12.24	12.40	32722	33155	Aumenta
Matorral costero	4.75	4.40	12708	11766	Disminuye
Asentamientos humanos	1.58	3.62	4227	9689	Aumenta
Bosque de pino	1.05	1.05	2799	2803	Se mantiene
Ripario	0.57	0.53	1518	1405	Disminuye
Marisma	0.12	0.11	309	283	Disminuye
Dunas costeras	0.08	0.07	210	186	Disminuye
Cuerpo de agua	0.04	0.04	98	98	Se mantiene

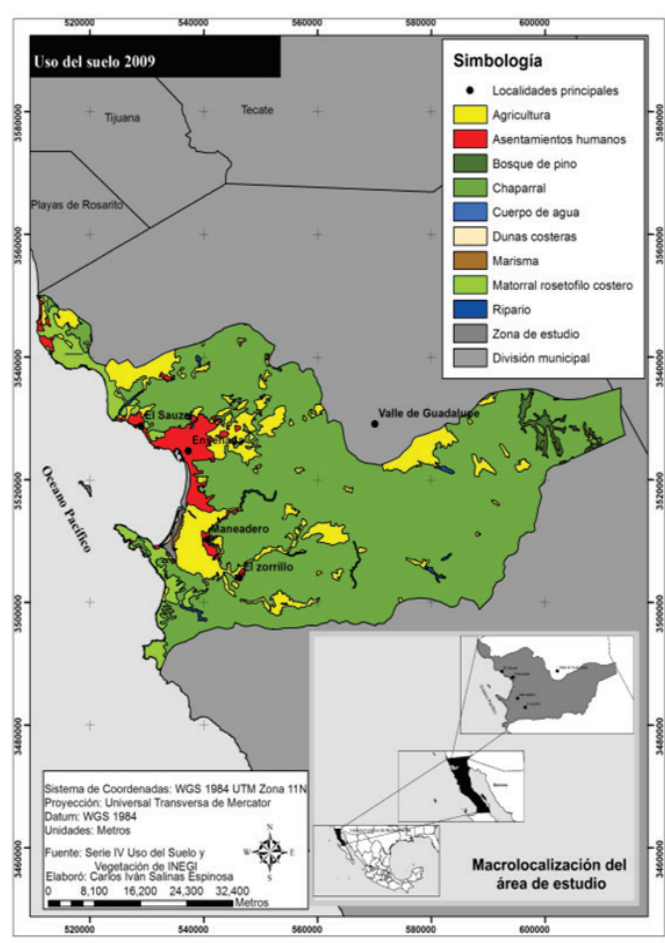
Fuente: elaboración propia a partir de la comparación de INEGI (1993 y 2009).

Figura 3. Uso del suelo 1993.



Fuente: INEGI (1993).

Figura 4. Uso del suelo 2009.



Fuente: INEGI (2009).

Matrices de transición anual y múltiple

El cruce de mapas de 1993 y 2009, generó dos tipos de matrices, la matriz de un solo paso, es decir para un periodo de tiempo dado, y la matriz anualizada para 16 años. Éstas arrojaron 23 transiciones, de las cuales fueron seleccionadas las seis con valores de cambio mayor, que correspondían a transiciones de cubiertas naturales a antrópicas. La mayoría de las transiciones con valores muy bajos representaban cambios entre categorías de cobertura y uso del suelo natural, así el modelo se construyó solo con los cambios originados por la acción humana, dando sentido al análisis de deforestación. Las transiciones empleadas en el modelo se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Variables con mayor peso para cada transición.

De (1993)	Cambio		Variable	peso
		A (2009)		
Ripario	Asentamientos humanos		distancia a localidades	6.29157
Ripario	Agricultura		distancia a localidades	5.60739
Matorral costero	Asentamientos humanos		distancia a asentamientos humanos	3.69183
Agricultura	Asentamientos humanos		distancia a línea de costa	3.4619
Dunas costeras	Asentamientos humanos		distancia a agricultura	2.74084
Chaparral	Agricultura		distancia a agricultura	2.64599

Fuente: elaboración propia.

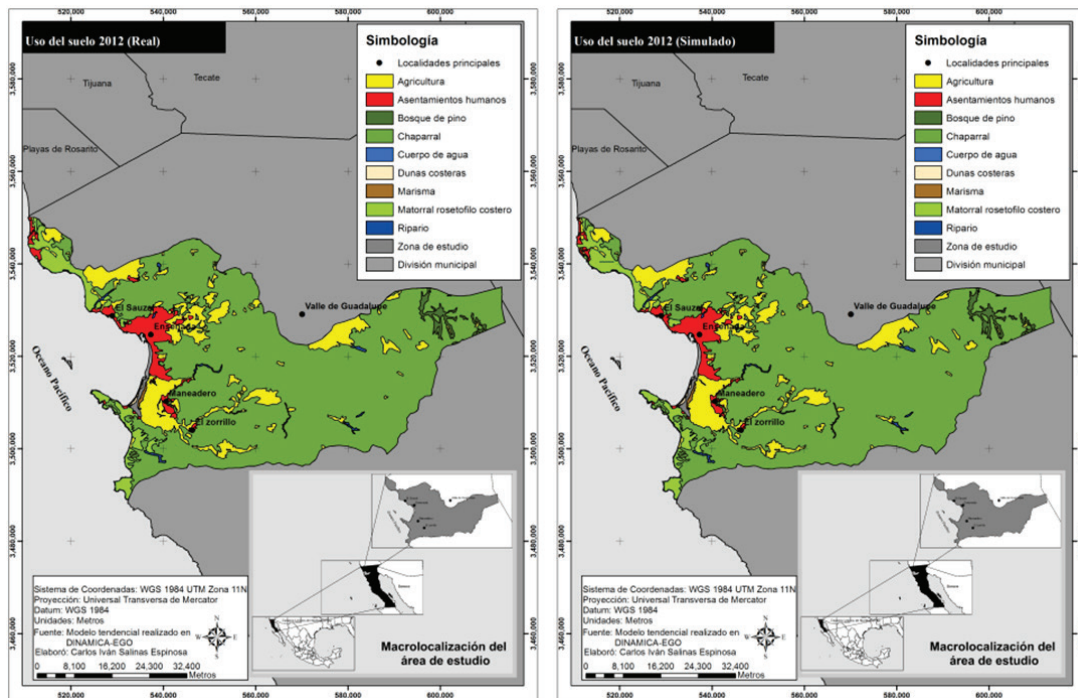
Pesos de evidencia y construcción del modelo

El modelo se construyó con cuatro (ver tabla 4) de las seis variables explicativas inicialmente consideradas: distancia a arroyos, distancia a carreteras, altitud, pendiente, distancia a la línea de costa y distancia a localidades urbanas (mayores a 2500 habitantes), dos variables (altitud y pendiente) fueron eliminadas del modelo al presentar correlación, ya que resultaron con un valor superior a 0.35 para el índice de Cramer (Almeida, 2004). Así para las seis transiciones, se calcularon inicialmente 54 pesos de evidencia, de los cuales quedaron en el modelo final solo 43 al eliminar 11 que correspondían a las dos variables eliminadas por presentar un valor del índice de Cramer superior al límite propuesto, así el modelo final se integró con cuatro variables y 43 pesos de evidencia. En el cálculo de los pesos de evidencia existieron variables que tuvieron más influencia en el modelo, la tabla 4 muestra la variable que tuvo la mayor influencia por cada transición. Las variables pendiente y tipo de suelo, eliminadas del modelo, aportan valores cercanos a cero, solo con dos excepciones en el cual el tipo de suelo aporta a dos transiciones (transición de dunas a asentamientos humanos y transición matorral costero a asentamientos humanos). Se encontraron tres tipos de valores, el peso (+), el peso (-) y el peso (0), los pesos mayores a 0 incrementan el valor de probabilidad de la transición y los menores a este valor disminuyen dicha probabilidad.

VALIDACIÓN DEL MODELO

Mediante la utilización de los mapas de 2012 (real y el simulado) en el modelo elaborado (figura 5), se realizó la validación del modelo.

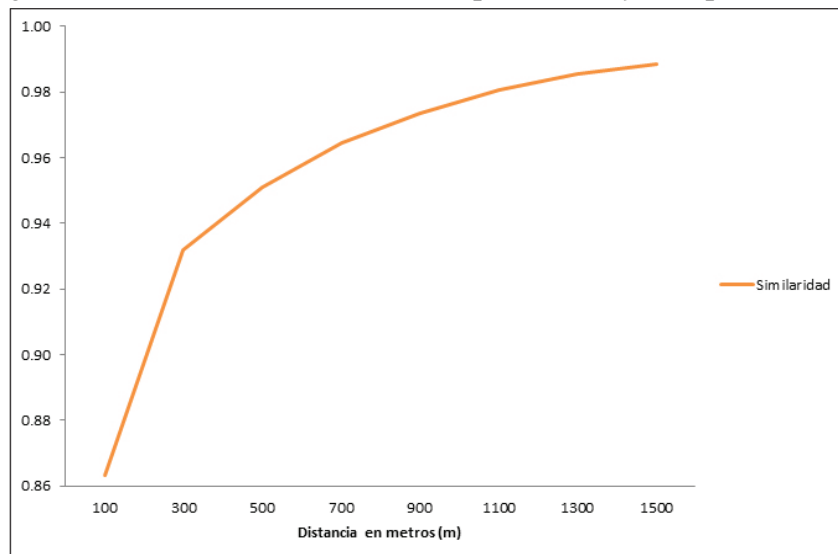
Figura 5. Mapa real y simulado para el año 2012, utilizado para validar el modelo.



Fuente: Serie V de Uso del Suelo y Vegetación de INEGI y elaboración propia modificado del mismo.

En la figura 6 se muestran los valores de similitud obtenidos en cada tamaño de ventana utilizada: la similitud a 100 metros fue de 0.86 y se calculó con un aumento cada 200 metros, la validación final a 1500 metros fue de 0.98 por lo que se considera un modelo de calidad ya que según los criterios de coincidencia, el modelo es bueno por tener valores superiores a 0.80 (Almeida, 2004).

Figura 6. Similaridad obtenida entre el mapa simulado y el mapa observado.



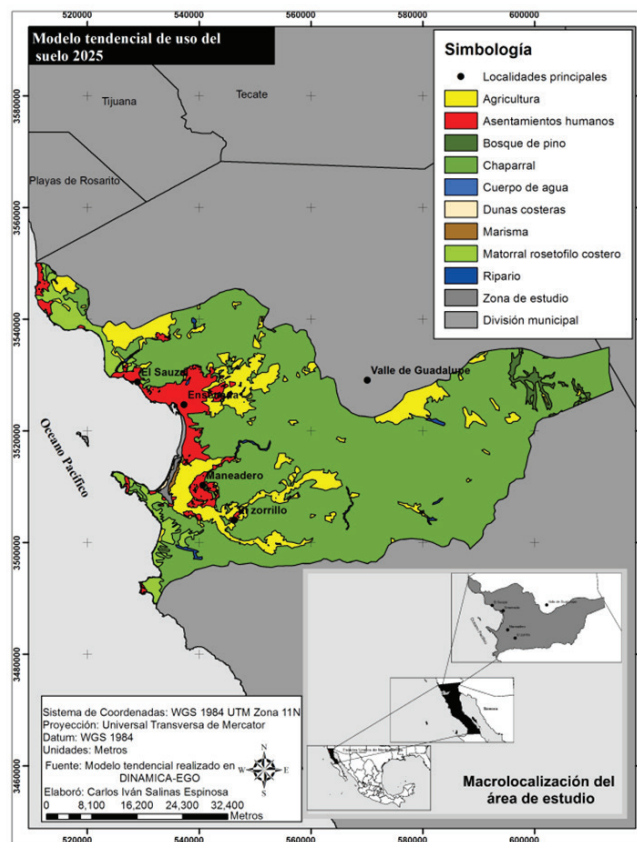
Fuente: elaboración propia a partir de los datos obtenidos en DINAMICA-EGO.

Considerando que el modelo realizado era un modelo de buena calidad, se realizó la simulación para el 2025 obteniéndose los resultados que se describen en los párrafos subsecuentes.

ESCENARIO TENDENCIAL 2025

Se elaboró el modelo proyectivo tendencial hacia el 2025 (figura 7), las transiciones que no se incluyeron en el modelo, no presentaron cambios respecto al año 2009. No obstante, se observa un crecimiento tendencial en las mismas zonas donde hubo crecimiento en el periodo de 1993 a 2009. El modelo mostró las tendencias acordes a las variables y lo observado en el periodo previo.

Figura 7. Modelo tendencial de uso del suelo 2025.



Fuente: elaboración propia con base en el modelo proyectivo generado en DINAMICA-EGO.

La tabla 5 muestra las tendencias en aumento. Los principales cambios continuarían en las zonas de agricultura y asentamientos humanos, así como la disminución del chaparral, el matorral y el ripario. El resto de las categorías de cobertura y uso del suelo no presentarían cambios comparándose con el año 2009.

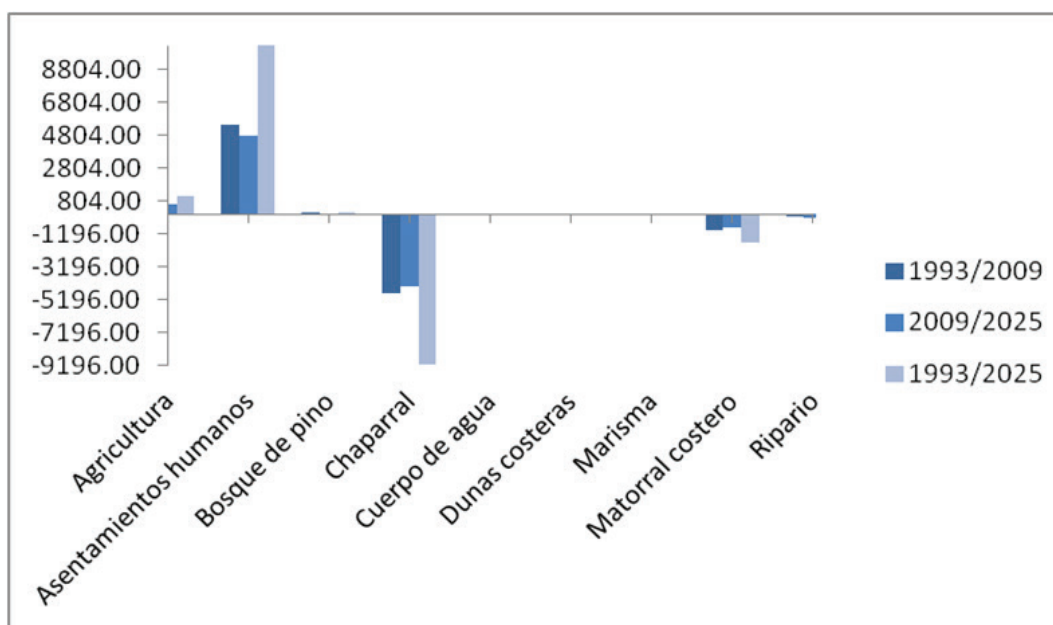
Tabla 5. Extensión por categoría de cobertura y uso del suelo y periodo de estudio.

Categoría	Hectáreas			Porcentaje		
	1993	2009	2025	1993	2009	2025
Agricultura	32,722	33,155	33,795	12.24	12.40	12.64
Asentamientos humanos	4,227	9,689	14,515	1.58	3.62	5.43
Bosque de pino	2,799	2,803	2,803	1.05	1.05	1.05
Chaparral	212,776	207,982	203,580	79.58	77.79	76.14
Cuerpo de agua	98	98	98	0.04	0.04	0.04
Dunas costeras	210	186	186	0.08	0.07	0.07
Marisma	309	283	283	0.12	0.11	0.11
Matorral costero	12,708	11,766	10,956	4.75	4.40	4.10
Ripario	1,518	1,405	1,151	0.57	0.53	0.43

Fuente: elaboración propia.

La figura 8 presenta las pérdidas y ganancias en hectáreas para cada una de las categorías de cobertura y uso del suelo, comparando los tres periodos estudiados. En ella se pueden observar las tendencias de ganancia en superficie en la cobertura que representa antropización (Asentamientos humanos) y las pérdidas en las coberturas naturales (Chaparral y Matorral costero) para los tres periodos.

Figura 8. Pérdidas y ganancias en hectáreas para cada categoría de cobertura y uso de suelo en los tres periodos estudiados.



Fuente: elaboración propia.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En el área de estudio, los asentamientos humanos aumentaron de 1993 a 2009 un 1.8% anual. En el modelo tendencial se encontró que podrían aumentar de 2009 a 2025 un 1.6% cada año. El modelo indica que en el año de 2025 se tendrá una extensión de asentamientos humanos de 14,500 hectáreas, lo que significa que la superficie que ocupará la mancha urbana en el 2025 se triplicará con relación al año 1993. La agricultura tendrá una extensión aproximada de 33,795 hectáreas, que equivale a un aumento de 3% respecto a 1993.

Para este mismo periodo, las coberturas naturales presentan tres cambios: la disminución de alrededor 4% de chaparral, 14% de matorral y 25% de ripario, lo cual significa una pérdida de 9,200, 1,752 y 367 hectáreas, respectivamente.

Los cambios observados coinciden con el modelo de crecimiento planteado por el Instituto Municipal de Investigación y Planeación de Ensenada (IMIP), en el que el crecimiento de la zona urbana ha sido más o menos ordenado, presentándose principalmente en zonas contiguas con los mismos usos, es decir, la agricultura y las zonas urbanas crecieron en las áreas aledañas correspondientes de 1993 al 2009, tal como se manifestó del 2009 al 2015 en el modelo tendencial. Este crecimiento ordenado puede ser resultado de que, desde 1995, el Centro de Población de Ensenada (CPE) está delimitado y cuenta con un programa de desarrollo urbano (PDU) (IMIPENS, 2009), el cual actualizado en el año 2005 y publicado en el Diario Oficial del Estado el 13 de marzo de 2009.

En el PDU, se menciona que las áreas con tendencia de crecimiento al 2030 serán las siguientes: El Sauzal hacia el noroeste, la porción noroeste del centro de población, la porción sur-sureste de la traza urbana y la porción sur en el valle de Maneadero. Estas proyecciones de crecimiento, que además tienen un fundamento en las políticas y estrategias vigentes para el crecimiento ordenado de la zona urbana, son compatibles con nuestros resultados, reflejando los usos urbano y agrícola como los de mayor extensión y dinamismo dentro del CPE.

El IMIP realizó también un análisis de la carta urbana del CPE de 1995, encontrando que los sitios propuestos como subcentros de crecimiento urbano, no se habían desarrollado (IMIPENS, s.f.). Consecuentemente, si se mantienen las políticas y estrategias para el desarrollo urbano establecidas en el PDU, el modelo de deforestación propuesto en este trabajo presentará una dinámica de cambio muy cercana a la realidad. Sin embargo, con el modelo creado y mediante la manipulación de los pesos de evidencia, se podrían construir escenarios tendenciales futuros para la dinámica del cambio y uso del suelo para el CPE y la cuenca que lo rodea.

En la revisión de literatura no se encontraron trabajos sobre este tema para la zona en estudio, o para la zona de Ensenada, solo trabajos sobre deforestación e incremento de la mancha urbana en el municipio de Tijuana (Farley et al., 2012; Ojeda-Revah et al., 2007; Ojeda-Revah, 2007) en

los cuales las tendencias históricas son las mismas que las de la zona de estudio: una constante deforestación que favorece el crecimiento de asentamientos humanos y las coberturas y usos antrópicos.

Aunque para la zona no hay trabajos previos, podemos comparar el presente análisis con el realizado por Rosete et al. (2008, 2013) para la Península de Baja California, en el cual muestra que los principales cambios se localizaron en el extremo norte de la península y con tendencias a la antropización. En nuestro estudio, los cambios históricos y probables que se dan a través del tiempo son en la parte media del CPE y la tendencia de crecimiento urbano observada es hacia el sur del CPE y en el sureste del polígono en estudio.

Nuestros resultados coinciden también con las investigaciones realizadas en otras zonas del país, donde se han realizado trabajos de modelado y simulación del CUS ya que se ha encontrado la misma constante, un aumento de agricultura y coberturas herbáceas, así como de asentamientos humanos, y una pérdida de vegetación natural (Aguilera, 2006; Díaz-Gallegos, Mas, & Velázquez, 2008; López, Bocco, Mendoza, & Duhau, 2001; Mas y Flamenco, 2011; Rosete et al., 2013; Sahagún-Sánchez, Reyes-Hernández, Flores Flores, & Vargas, 2011).

Este tipo de modelos para Baja California podrían incluirse dentro de las políticas de planeación, ya que en Baja California solo el IMIP hizo su planeación al 2030 con una expresión espacial del centro de población. La Conabio sugiere la incorporación de proyecciones en la planeación y ordenamiento del territorio, ya que los modelos de este tipo tienen el potencial de simular la posible respuesta a cuestiones de impactos de las políticas públicas en el uso de los recursos. Tomando en cuenta lo anterior, es necesario considerar en el modelado las estimaciones del impacto del manejo actual de los recursos dado por las actividades humanas, bajo diferentes escenarios que permitan observar las posibles tendencias y crear políticas en el corto, mediano y largo plazo y en algunos casos, disminuir los impactos de las actividades humanas como la deforestación y el cambio en el uso del suelo.

El CUS y la deforestación en particular son fenómenos que se perciben diferente según la escala utilizada, como también sus consecuencias, y se pueden tomar decisiones acorde a cada escala (Bocco, Mendoza, & Masera, 2001; Arriaga 2009). Por lo anterior es imprescindible tomar en cuenta la escala de las variables con las que se construye el modelo y la congruencia con los productos y la aplicabilidad de los resultados.

Para estudios posteriores se sugiere la inclusión de variables sociales, aunque como se mencionó anteriormente esto necesariamente debe de ser analizado en el contexto local, ya que las variables sociales que pueden ocasionar el CUS varían ampliamente de una región a otra (Bawa & Dayanandan, 1997). Algunas de estas variables de tipo social pueden ser indicadores de marginación, pobreza y desarrollo humano, bajo el supuesto de que inciden directa o indirectamente en el CUS

(Loening & Markussen, 2003; Reid & Swiderska, 2008).

A la par de que se incrementa la complejidad del modelo, es conveniente aumentar el grado de certeza en la validación para su inclusión en las políticas de planeación. Ya que anteriormente los modelos eran elaborados mediante un solo principio, como autómatas celulares (Aguilera, 2006; Balzter, Braun, & Kohler, 1998) y cadenas de Markov o matrices de transición (López, Bocco, & Mendoza, 2001; Paegelow, Camacho, & Menor, 2003), los cuales no se encuentran alejados de la realidad, pero son modelos incompletos. El modelo presentado en este trabajo, incluye una mayor cantidad de variables y pueden ser proyectadas en periodos anuales o de varios años, lo que ayuda a aumentar la resolución de los resultados y flexibiliza su aplicación en la toma de decisiones.

Asimismo, es importante construir el escenario de conservación, a través de la manipulación de los pesos y valores del modelo, para simular la aplicación de políticas o acciones para la conservación de la cubierta de vegetación y los usos que la favorezcan, así como también otros escenarios probables donde se incluyan las consecuencias de la deforestación (Galicia, García, Gómez-Mendoza, & Ramírez, 2007), como lo son: la pérdida de diversidad, los cambios en la composición vegetal, la modificación o extinción de poblaciones, la contribución al calentamiento global por el cambio de cubiertas naturales a las de tipo antrópico, el aumento de las emisiones de CO₂, la degradación y pérdida de suelos, entre otros.

REFERENCIAS

- Aguilera, F. (2006). Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares. *GeoFocus*, 6, 81–112.
- Almeida, C. (2004). *Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento: simulação de mudanças de uso da terra em áreas urbanas para as cidades de bauru e piracicaba* (Tesis de doctorado), INPE: Brasil.
- Almeida, C., Batty, M., Miguel, A., Monteiro, V., & Ca, G. (2003). Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics : empirical development and estimation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 27, 481–509.
- Almeida, C. M., Gleriani, J. M., Castejon, E. F., & Soares-Filho, B. S. (2008). Using neural networks and cellular automata for modelling intraurban landuse dynamics. *International Journal of Geographical Information Science*, 22 (9), 943–963. doi:10.1080/13658810701731168.
- Arriaga, L. (2009). Implicaciones del cambio de uso de suelo en la biodiversidad de los matorrales xerófilos : un enfoque multiescalar. *Investigación Ambiental*, 1 (195), 6–16.
- Balzter, H., Braun, P. W., & Kohler, W. (1998). Cellular automata models for vegetation dynamics. *Ecological Modelling*, 107, 113–125.
- Bawa, K., & Dayanandan, S. (1997). Socioeconomic factors and tropical deforestation. *Nature*, 386, 562–563.

- Bocco, G., Mendoza, M., & Masera, O. (2001). La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas UNAM*, 44, 18–38.
- Bonham-Carter, G. (1994). *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Oxford: Pergamon.
- Ceballos, G., Arroyo, J., Rodrigo, M., & Yolanda, D. (2005). Lista actualizada de los mamíferos de México. *Revista Mexicana de Mastozoología*, 9, 21–71.
- Conabio (2001). *Subcuencas Hidrológicas. Información vectorial en línea*. Recuperado de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Conafor (2012). *Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Informe 2004-2009*. Recuperado de http://www.ccmss.org.mx/descargas/Inventario_nacional_forestal_y_de_suelos_informe_2004_-_2009_.pdf
- Dallman, P. (1998). *Plant life in the world's mediterranean climates*. California: University of California Press.
- Díaz-Gallegos, J. R., Mas, J. F., & Velázquez, A. (2008). Monitoreo de los patrones de deforestación en el corredor biológico mesoamericano, México. *Interciencia*, 33, 882–890.
- Dirzo, R., & Raven, P. H. (2003). Global state of biodiversity and loss. *Annual Review of Environment and Resources*, 28 (1), 137–167. doi:10.1146/annurev.energy.28.050302.105532
- Espejel, I., Aramburo, G., Leyva, C., Cruz, Y., Bravo, L., & Flores, J. D. (2001). Coastal management in the Mediterranean type of vegetation in Baja California Mexico. Medcoast. En E. Ozhan (Ed.), *Proceedings of the Fifth International Conference on the Mediterranean Coastal Environment*.
- FAO (2010). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010 Informe principal*. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/013/i1757s/i1757s.pdf>
- Farley, K. A., Ojeda-Revah, L., Atkinson, E. E., & Eaton-González, B. R. (2012). Changes in land use, land tenure, and landscape fragmentation in the Tijuana River Watershed following reform of the ejido sector. *Land Use Policy*, 29 (1), 187–197. doi:10.1016/j.landusepol.2011.06.006
- Galicia, L., García, A., Gómez-Mendoza, L., & Ramírez, M.I. (2007). Cambio de uso de suelo y degradación ambiental (en línea). *Ciencia, Revista de la Academia Mexicana de Ciencias*, 58. Recuperado de <http://googl/eDOXEe>
- Geist, H. J., & Lambin, E. F. (2001). *What Drives Tropical Deforestation? A meta-analysis based on subnational case study evidence*. Recuperado de <http://www.pik-potsdam.de/~luedeke/lucc4.pdf>
- Geist, H., & Lambin, E. (2002). Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation. *BioScience*, 52 (2), 143–150.
- González-Botello, M. A., & Bullock, S. H. (2012). Erosion-reducing cover in semi-arid shrubland. *Journal of Arid Environments*, 84, 19–25. doi:10.1016/j.jaridenv.2012.04.002
- Hagen, A. (2003). Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. *International Journal of Geographical Information Science*, 17 (3), 235–249. doi:10.1080/13658810210157822
- INEGI (2013). *Conjunto Nacional de Uso del Suelo y Vegetación a escala 1:250,000*. México: INEGI.
- Instituto Municipal de Investigación y Planeación de Ensenada, B.C. (IMIPENS). (2009). *Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población Ensenada 2030*. Recuperado de <http://imipens.org/pducup/>
- Instituto Municipal de Investigación y Planeación de Ensenada, B.C. (IMIPENS). (s.f.). *La carta urbana de*

- 1995 frente a la realidad actual. Recuperado de <http://imipens.org/pducip/> Consultado el 31 de agosto de 2014.
- Irwin, E. G., & Geoghegan, J. (2001). Theory, data, methods: developing spatially explicit economic models of land use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85 (1-3), 7–24. doi:10.1016/S0167-8809(01)00200-6
- Jorgensen, S. E., & Bendoricchio, G. (2001). *Fundamentals of ecological modelling* (3ra ed.). Oxford: Elsevier.
- Lambin, E. (1994). *Modelling deforestation processes: A Review*. Luxemburg: European Comission. Recuperado de http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/01431169608949066#.VeC5E_mqpBc
- Loening, L., & Markussen, M. (2003). *Pobreza, deforestación y pérdida de la biodiversidad en Guatemala*. Recuperado de <http://econwpa.repec.org/eps/dev/papers/0301/0301003.pdf>
- López, E., Bocco, G., & Mendoza, M. (2001). Predicción del cambio de cobertura y uso del suelo . El caso de la ciudad de Morelia Prediction about changes in land-use . The case of Morelia. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 45, 56–76.
- López, E., Bocco, G., Mendoza, M., & Duhau, E. (2001). Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe A case in Morelia city , Mexico. *Landscape and Urban Planning*, 55, 271–285.
- Maeda, E., Almeida, C. M., Carvalho, A. de, Formaggio, A., Shimabukuro, Y., & Pellikka, P. (2011). Dynamic modeling of forest conversion: Simulation of past and future scenarios of rural activities expansion in the fringes of the Xingu National Park, Brazilian Amazon. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13 (3), 435–446. doi:10.1016/j.jag.2010.09.008
- Mas, J.F., Filho, B., Pontius, R., Gutiérrez, M., & Rodrigues, H. (2013). A Suite of Tools for ROC Analysis of Spatial Models. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2 (3), 869–887. doi:10.3390/ijgi2030869
- Mas, J.F., & Flamenco, A. (2011). Modelación de los cambios de coberturas/uso del suelo en una región tropical de México. *GeoTrópico*, 5 (1), 1–24.
- Mas, J. F., Kolb, M., Paegelow, M., Camacho Olmedo, M. T., & Houet, T. (2014). Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages. *Environmental Modelling & Software*, 51, 94–111. doi:10.1016/j.envsoft.2013.09.010
- Mas, J. F., Pérez-Vega, A., & Clarke, K. C. (2012). Assessing simulated land use/cover maps using similarity and fragmentation indices. *Ecological Complexity*, 11, 38–45. doi:10.1016/j.ecocom.2012.01.004
- Merry, F., Soares-Filho, B., Nepstad, D., Amacher, G., & Rodrigues, H. (2009). Balancing conservation and economic sustainability: the future of the Amazon timber industry. *Environmental Management*, 44 (3), 395–407. doi:10.1007/s00267-009-9337-1
- Mittermier, R., & Goettsch, C. (1992). La importancia de la diversidad biológica de México. En J. Sarukhán y R. Dirzo (comp.), *México ante los retos de la biodiversidad*. (pp. 63–73). México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Oberbauer, T. (1999). La vegetación del noroeste de Baja California. *Freemontia*, 16–27.
- Ojeda-Revah, L. (2007). *Una cuenca dos historias. La cuenca del Rio Tijuana*. Mexicali: UABC.
- Ojeda-Revah, L., Bocco, G., Ezcurra, E., & Espejel, I. (2007). Land-cover / use transitions in the binational Tijuana River watershed during a period of rapid industrialization. *Applied Vegetation Science*, 107–116. doi:10.3170/2007-7-18331

- Paegelow, M., Camacho, M., & Menor, J. (2003). Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje. *GeoFocus*, 3, 22–44.
- Pase, C. P., & Brown, D. E. (1982). Californian coastal scrub. En D. Brown (Ed.), *Biotic communities of the southwest of United States and Mexico* (pp. 86–89). Arizona: University of Arizona.
- Pontius, R. G., Huffaker, D., & Denman, K. (2004). Useful techniques of validation for spatially explicit land-change models. *Ecological Modelling*, 179 (4), 445–461. doi:10.1016/j.ecolmodel.2004.05.010
- Reid, H., & Swiderska, K. (2008). *Biodiversidad, cambio climático y pobreza: una exploración de los vínculos. Nota Informativa del IIED*. Recuperado de <http://pubs.iied.org/pdfs/17034SIIED.pdf>
- Riemann, H., & Ezcurra, E. (2007). Endemic regions of the vascular flora of the peninsula of Baja California, Mexico. *Journal of Vegetation Science*, 18 (3), 327–336.
- Rodríguez, P., Soberón, J., & Arita, H. (2003). El componente beta de la diversidad de mamíferos de México. *Acta Zoologica Mexicana*, 259, 241–259.
- Rosete, F., Pérez, J. L., & Bocco, G. (2008). Cambio de uso del suelo y vegetación en la Península Baja California Península, Mexico. *Investigaciones Geográficas*, 67, 39–58.
- Rosete, F., Velázquez, A., Bocco, G., & Espejel, I. (2013). Multi-scale land cover dynamics of semiarid scrubland in Baja California, Mexico. *Regional Environmental Change*, 14, 1315–1328. doi:10.1007/s10113-013-0574-8
- Sahagún-Sánchez, F. J., Reyes-Hernández, H., Flores Flores, J. L., & Vargas, L. C. (2011). Modelización de escenarios de cambio potencial en la vegetación y el uso de suelo en la Sierra Madre Oriental de San Luis Potosí, México. *Journal of Latin American Geography*, 10 (2), 65–86. doi:10.1353/lag.2011.0029
- Salinas-Espinosa, C., Leyva, C., & Eaton, R. (2013). Evaluación del crecimiento urbano en ciudades en el noroeste de México caso centro de población de Ensenada, Baja California (Resumen). En *VII Congreso de Ordenamiento Ecológico del Territorio*.
- Soares-Filho, B., Rodrigues, H., & Follador, M. (2013). A hybrid analytical-heuristic method for calibrating land-use change models. *Environmental Modelling & Software*, 43, 80–87. doi:10.1016/j.envsoft.2013.01.010
- Soares-Filho, B., Rodrigues, H. O., & Costa, W. L. (2009). *Modelamiento de Dinámica Ambiental con Dinamica EGO*. Recuperado de http://www.csr.ufmg.br/dinamica/tutorial/Dinamica_EGO_guia_pratica.pdf
- Soares-Filho, B. S., & Coutinho, G. (2002). DINAMICA — a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling*, 154, 217–235.
- Soares-Filho, B. S., Nepstad, D. C., Curran, L. M., Cerqueira, G. C., Garcia, R. A., Ramos, C. A., Voll, E., McDonald, A., Lefebvre, P., Schlesinger, P. (2006). Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature*, 440 (7083), 520–3. doi:10.1038/nature04389
- Trombulak, S. C., & Frissell, C. A. (2000). Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. *Conservation Biology*, 14 (1), 18–30.
- Turner, M., Arthaud, G., Engstrom, T., Hejl, S., Liu, J., Loeb, S., & McKelvey, K. (1995). Usefulness of spatially explicit population models in land management. *Ecological Applications*, 5 (1), 12–16.
- Veldkamp, A., & Lambin, E. (2001). Predicting land-use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85

- (1-3), 1–6. doi:10.1016/S0167-8809(01)00199-2
- Villa-Vialaneix, N., Follador, M., Ratto, M., & Leip, A. (2012). A comparison of eight metamodeling techniques for the simulation of N₂O fluxes and N leaching from corn crops. *Environmental Modelling & Software*, 34, 51–66. doi:10.1016/j.envsoft.2011.05.003
- Wake, D. B., & Vredenburg, V. T. (2008). Are we in the midst of the sixth mass extinction? A view from the world of amphibians. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105. doi:10.1073/pnas.0801921105
- White, R., Engelen G, & Uljee, I. (1997). The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics. *Environment and Planning B*, 24, 323–344.
- Wikramanayake, E., Dinerstein, E., Loucks, C., Olson, D., Morrison, J., Lamoreux, J. McKnight, M., & Hedao, P. (2002). Ecoregions in Ascendance : Reply to Jepson and Whittaker, 16 (1), 238–243.

MODELO PROSPECTIVO DE CRECIMIENTO PERIURBANO PARA UNA CIUDAD MEDIA. EL CASO DE MORELIA, MICHOACÁN

Sandra Lasso de la Vega, Jean-François Mas y Antonio Vieyra Medrano*

INTRODUCCIÓN

Debido al crecimiento urbano rápido y desordenado que la ciudad media de Morelia y su Zona Metropolitana han mostrado principalmente a partir de la década de los ochenta, se ha observado una limitada capacidad de gestión y dotación de servicios y equipamiento urbanos por parte de los gobiernos locales que se han visto rebasados ante la proliferación y expansión de asentamientos, en su mayoría hacia el “anillo” exterior de la ciudad, llamado periurbano. El Instituto Municipal de Desarrollo Urbano de Morelia (IMDUM), en su Programa de Desarrollo Urbano (PDU) 2010, señala que Morelia ha seguido el patrón urbano presente en muchas de las ciudades de América Latina, con el crecimiento “anárquico” y “desorganizado” de la ciudad, y superior al crecimiento poblacional, que conlleva a un patrón difuso y extenso.

De esta forma, en este trabajo se integran conceptos sobre crecimiento periurbano y la forma en la que éstos se representan en el crecimiento que han tenido las ciudades y la zona metropolitana. Entre ellos, los conceptos de difusión urbana (Dubois-Taine & Chalas, 1997), discontinuidad física (Banzo, 2005), extensión continua de la ciudad y absorción paulatina de los espacios rurales (Ávila, 2001), segregación geográfica (Aguilar & Mateos, 2011) y ciudad fragmentada (Borsdorf, 2003), tienen representación evidente en la forma en que la ciudad se ha expandido. Aunque las

* Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, salavere@hotmail.com, jfmas@ciga.unam.mx y avieyra@ciga.unam.mx

investigaciones que derivaron en los conceptos anteriores se realizaron generalmente en grandes metrópolis, los patrones establecidos podrían repetirse actualmente en ciudades de tamaño menor, como es el caso de las ciudades medias.

En este sentido, los modelos de simulación urbana ayudan a tener una mejor comprensión de los procesos de expansión urbana y sus conductores (Batty, Xie, & Sun, 1999; Sudhira, Ramachandra, & Jagadish, 2004; Verburg, Schot, Djist, & Veldkam, 2004), permiten reproducir procesos de cambio pasados (Paegelow & Camacho-Olmedo, 2008), así como crear escenarios prospectivos (Hansen, 2010; Santé, García, Miranda, & Crecente, 2010); con lo cual se pueden evaluar posibles consecuencias del crecimiento (Aguilera-Benavente & Talavera-García, 2009; Mitsova, Shuster, & Wang, 2011).

Al respecto, Barreira-González, Aguilera-Benavente y Gómez-Delgado (2012) explican que el incremento de la velocidad y de la magnitud de los cambios urbanos propició una “nueva ola de simulación urbana” que se ha reflejado en el desarrollo de numerosas herramientas de modelación (López, Bocco, Mendoza, & Duhau, 2001; Gómez-Delgado & Barredo, 2005; Paegelow & Camacho-Olmedo, 2008; Aguilera-Benavente, Valenzuela-Montes, & Bosque Sendra, 2010; Plata-Rocha, Gómez-Delgado, & Bosque-Sendra, 2011). Por lo que, los modelos de simulación del crecimiento urbano han sido aplicados prácticamente en todas las regiones del mundo como Europa (Barredo et al., 2003; Aguilera-Benavente et al., 2010; García, Santé, Crecente, & Miranda., 2011), Estados Unidos (Mitsova et al., 2011), África (Barredo, Demicheli, Lavalle, Kasanko, & McCormick, 2004), América Latina (Almeida, 2003; Almeida et al., 2005) o Asia (Liu & Andersson, 2004; Sudhira et al., 2004).

Desde la perspectiva latinoamericana, cabe destacar algunos trabajos realizados en México y Brasil como el de Soares-Filho (1998), quién es el principal desarrollador del programa DINAMICA EGO, paquete utilizado en el desarrollo de esta investigación; posteriormente López et al. (2001) realizaron la primera investigación sobre el crecimiento urbano de la ciudad de Morelia; consecutivamente Almeida (2003) modeló el crecimiento urbano; y Rosseti, Almeida y Pinto (2013) agregaron al modelo de evaluación de cambio de uso de suelo, la utilización de la zonificación urbana a manera de variable explicativa.

Por lo tanto, el presente estudio tiene por objetivo evaluar y analizar el crecimiento de la ciudad de Morelia y de las localidades circundantes, a través del desarrollo de un modelo de simulación del crecimiento periurbano que toma en cuenta variables físicas, sociales, económicas y políticas.

ÁREA DE ESTUDIO

La ciudad de Morelia se encuentra al centro-occidente de la República Mexicana (figura 1) entre los paralelos 19°52' y 19°26' de latitud norte; los meridianos 101°02' y 101°31' de longitud oeste (INE-

MATERIALES

Para elaborar la cartografía del crecimiento de la ciudad se utilizaron ortofotos de los años 1995, 2000 y 2005, así como la imagen SPOT de finales del 2009 (tabla 1).

Para construir la base de datos sobre eventuales factores de los cambios se utilizaron: un modelo digital de elevación, un mapa de vialidades, mapas de cubiertas/uso de suelo (años 1993, 2000 y 2007), mapa de Areas Geoestadísticas Básicas (AGEB) con los datos estadísticos de los censos de INEGI, mapa de tenencia de la tierra, mapas de zonificación primaria (áreas urbanas, urbanizables y no urbanizables) y de zonificación secundaria (zonas habitacionales, industriales, comerciales, áreas naturales protegidas, etc.) (tabla 1).

Tabla 1. Insumos utilizados en el modelo.

Descripción	Resolución/Escala	Fuente
Cartografía del crecimiento de la ciudad:		
Ortofoto 1995	2 m.	INEGI
Ortofoto 2000	0.5 y 2.0 m.	INEGI
Ortofoto 2005	1 m.	INEGI
Imagen Dic 2009	10 m.	SPOT
Construcción de la base de datos de factores de los cambios:		
Modelo digital de elevación	5 m	Imágenes Lidar de INEGI
Mapa de vialidades	1:50,000	INEGI
Mapa de cobertura/uso de suelo del año 1993	1:250,000	INEGI
Mapa de cobertura/uso de suelo del año 2000	1:250,000	INEGI
Mapa de cobertura/uso de suelo del año 2007	1:250,000	Elaboración propia (Con base en el mapa de INEGI del año 2000)
Mapa de áreas geoestadísticas básicas (AGEB)		INEGI
Mapa de tenencia de la tierra	1:20,000	Plan de Desarrollo Urbano 1998
Mapa de zonificación primaria (áreas urbanas, urbanizables y no urbanizables)	1:20,000	Planes de Desarrollo Urbano 1998 y 2010
Mapa de zonificación secundaria (zonas habitacionales, industriales, zonas de equipamiento urbano e infraestructura, zonas urbanizables y zonas de preservación y reserva ecológica)	1:20,000	Planes de Desarrollo Urbano 1998 y 2010

Fuente: elaboración propia.

Inicialmente, se había considerado utilizar variables socioeconómicas basadas en la información por AGEB que genera INEGI en sus censos y conteos de población y vivienda, para la construcción de mapas de “calidad de vivienda y exclusión social”, pero esta información tiene inconsistencias

de continuidad entre períodos, por lo cual se optó por variables exclusivamente económicas de zonificación obtenidas de los Planes de Desarrollo Urbano de los años 1998 y 2010 (IMDUM, 1998 y 2010). Dicha información es la siguiente: zonas habitacionales, zonas industriales, zonas de equipamiento urbano e infraestructura y zonas urbanizables, y zonas de preservación y reserva ecológica. Para la elaboración de la base de datos se utilizó el sistema de información geográfica ArcGIS, mientras que la modelización se llevó a cabo con DINAMICA EGO (Soares-Filho, Rodrigues, & Costa, 2009), una plataforma para modelación ambiental con la cual se pueden construir y diseñar modelos dinámicos de diversa índole, que presenta potencial por su flexibilidad y sus posibilidades de interacción con otras herramientas (Mas, Kolb, Paegelow, Camacho-Olmedo, & Houet., 2014).

CONSTRUCCIÓN DE LA BASE DE DATOS

En primer lugar se realizó una interpretación visual de las ortofotos de INEGI de los años 1995, 2000 y 2005, así como de la imagen SPOT del 2009, mediante la interpretación visual interdependiente (FAO, 1996), para actualizar y/o desactualizar los contornos urbanos delimitados por Vieyra y Larrazábal (2009). Este método se basa en la modificación de los límites entre categorías de una capa base en relación con lo observado en imágenes de otras fechas (Paniagua, Cárdenas, & Ramírez, 2011), con la ventaja de que modifica únicamente las áreas en donde hay cambios y de esta forma se pueden elaborar bases de datos multifechas en forma rápida, eficiente y congruente. De los contornos delimitados por Vieyra y Larrazábal (2009), el llamado “contorno inmediato” corresponde al límite urbano del año de 1993. Éste se utilizó para la interpretación visual, actualizando el contorno con base en las ortofotos de 1995, tomando en cuenta las nuevas áreas urbanizadas y aquellas donde el uso de suelo cambió hacia la urbanización, aunque en ese momento no hubiera aún alguna construcción manifiesta. De esta forma se elaboraron mapas de los contornos urbanos para los años 1995, 2000, 2005 y 2010.

Con base en estos mapas se identificaron: el polígono central correspondiente a la ciudad de Morelia y los polígonos secundarios en el entorno de la ciudad, y se estimó el crecimiento de la ciudad para los años analizados.

Por otra parte, con los mapas de factores del crecimiento se calcularon otros datos, como la pendiente y las distancias Euclidianas a ciertos rasgos urbanos (zonas urbanas, zonas industriales, equipamiento urbano e infraestructura, vialidades, fallas geológicas).

MODELACIÓN ESPACIAL DEL CRECIMIENTO PERIURBANO

El modelo se basa en un análisis de los patrones de cambios observados en el pasado que permiten evaluar las tasas y la relación espacial entre la localización de estos cambios y las variables “expli-

cativas” que influyen en su distribución espacial. Con base en este análisis, se pueden identificar las áreas más propensas a cambiar (mapas de probabilidad) y elaborar mapas prospectivos. De tal forma que, un modelo basado en un escenario tendencial utiliza los mismos patrones de cambio que los observados en el periodo anterior. Además, se pueden elaborar escenarios en los cuales estos patrones se alteran debido a una variación del entorno socio-ambiental (p. ej., nuevas políticas habitacionales o de conservación o cambios socioeconómicos) de la región modelada. Finalmente, se puede evaluar el mapa simulado comparándolo con un mapa “observado”, derivado del análisis de una imagen de satélite que sirve de referencia (Mas & Flamenco-Sandoval, 2011). Para una explicación amplia sobre los métodos de modelación utilizados, revisar a Bonham-Carter (1994), Soares-Filho, Pennachin, & Cerqueira (2002); Soares-Filho et al. (2009) y Mas et al. (2014).

Entrenamiento del modelo

Esta etapa consistió en evaluar los patrones de cambio de los distintos periodos y brindar información al modelo para determinar la cantidad de cambio, los tipos de transiciones y la localización más probable de éstos. Para ello, se sobrepusieron los mapas de los años 1995 y 2000 para generar una matriz de cambio que indicara la superficie de cada tipo de transición durante el periodo de observación (5 años). Esta matriz de cambio se transformó en una matriz de probabilidad de cambio (matriz de Markov) que indica la probabilidad de ocurrencia de cada transición durante un año y permite realizar proyecciones sobre una base anual (Soares-Filho et al., 2002).

Para identificar las áreas más propensas a los cambios, se comparó cartográficamente, para cada transición, la localización de los cambios observados durante 1995-2000 respecto a diferentes variables explicativas cartografiadas. Esta comparación permite establecer una relación entre el potencial de cambio y las variables a través de diferentes enfoques (análisis multi-criterio, regresiones, pesos de evidencia o redes neuronales, entre otros).

En este caso, DINAMICA EGO brinda herramientas para elaborar mapas de probabilidad de cambio con el método de los pesos de evidencia y eventualmente modificarlos utilizando algoritmos genéticos (Soares-Filho et al., 2009). El cálculo de pesos de evidencia se basa en las probabilidades de transición de uso/cubierta. Esto se fundamenta en el “Teorema de Bayes” de la probabilidad condicional, la cual es la probabilidad de que un evento ocurra, dado que otro evento, independiente del primero ya ocurrió (Bonham-Carter, 1994). El proceso se realiza para cada transición tomando en cuenta variables explicativas binarias (p. ej. dentro/fuera de un área protegida) o con múltiples categorías (tipos de tenencia de la tierra, rangos de pendiente) (Mas & Flamenco-Sandoval, 2011). Con base en los pesos de evidencia asociados a las diferentes variables explicativas, se calcula la probabilidad de ocurrencia de las transiciones bajo la influencia simultánea de las variables. Es importante notar que los pesos de evidencia asociados a cada variable explicativa

pueden representarse mediante una gráfica, en la que es posible observar de qué manera la variable analizada influye en el proceso de cambio.

En el modelo, es posible incorporar el conocimiento experto a través de la modificación de los pesos de evidencia. Esta operación se puede realizar de manera sencilla en la interface gráfica de DINAMICA EGO, y consiste en modificar el valor de los pesos cuando no son estadísticamente significativos, o bien, cuando el valor es estadísticamente significativo pero se considera que los pesos se sobre-ajustaron para representar los cambios que ocurrieron durante el periodo de entrenamiento y no representan una tendencia general e idónea para realizar proyecciones a futuro (Mas & Flamenco-Sandoval, 2011, Mas et al., 2014).

En el cálculo de los pesos de evidencia se requiere que las variables utilizadas sean independientes, ya que variables altamente correlacionadas tienen el mismo efecto en los cambios. Es decir, al introducir dos variables con correlación alta se estaría sobreestimando el efecto de tales variables en el cálculo de la probabilidad (Bonham-Carter, 1994). En este caso, para verificar la independencia entre las variables se calcularon el índice de Cramer y la incertidumbre de información conjunta (Bonham-Carter, 1994) para todas las combinaciones de pares de mapas. Los valores de ambos índices varían de cero a uno y en la medida en que el valor se acerque a uno las variables comparadas tienen mayor correlación. El límite de tolerancia que se adoptó fue de 0.45 y 0.35 tal como lo hizo Almeida (2003).

Escenarios

Los cambios se simularon con base en tres escenarios: El “Escenario Tendencial” o “Business as usual” replica en la simulación los patrones observados durante el periodo de entrenamiento (1995-2000). En otras palabras, este escenario considera que los cambios posteriores a 2000 siguen la misma velocidad y responden a las mismas condiciones que los cambios observados durante el periodo 1995-2000. El segundo escenario, llamado “Escenario PDU 1998”, simula los cambios de acuerdo con el Programa de Desarrollo Urbano de 1998 (PDU 1998). Para simular cambios que respeten el PDU, se tomó en cuenta la zonificación de protección de éste; asignando valores negativos a los pesos de evidencia correspondientes a las áreas de reserva y protección ecológica y al parque nacional, de tal manera que no permitiera simular crecimiento hacia estas áreas. El tercer escenario, llamado “Descentralización”, simuló el efecto del crecimiento habitacional suscitado a raíz del Programa de Vivienda del gobierno federal del año 2000. Éste se basó en un crecimiento reorientado hacia polos de desarrollo diferentes del centro (la ciudad de Morelia), siguiendo la teoría de la ciudad difusa (Dematteis, 1998) y fragmentada (Borsdorf, 2003). Para ello, se identificaron los municipios que presentan los mayores niveles de conurbación con Morelia para convertirlos en polos de atracción, aumentando la probabilidad de urbanización alrededor de las localidades de

Tarímbaro, Álvaro Obregón y Charo a manera de “imanes”. En este escenario se aumentó el valor de la tasa de crecimiento.

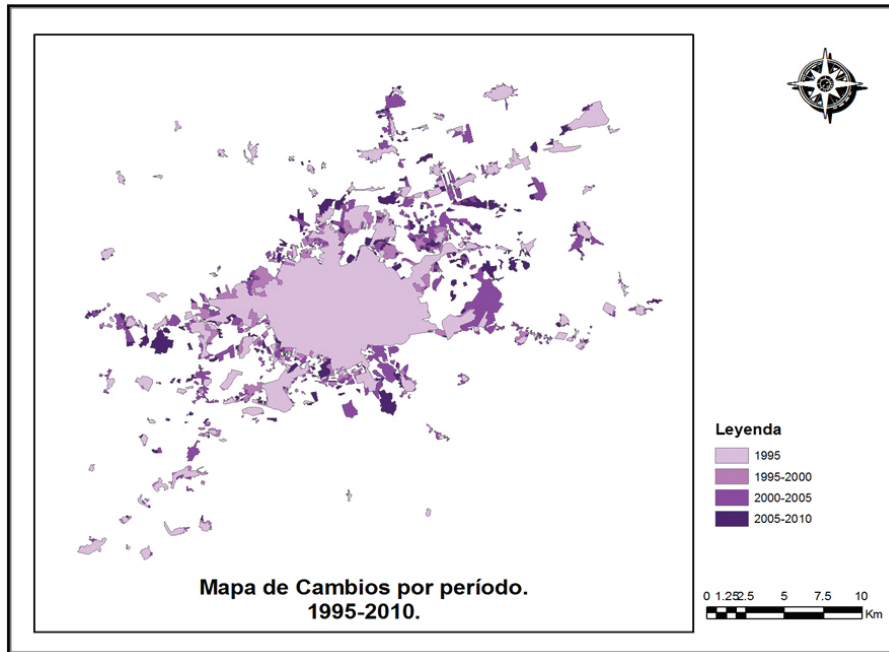
Para evaluar los mapas prospectivos, generalmente se modela una fecha para la cual se dispone de un mapa observado o de referencia y se evalúa la coincidencia entre el mapa simulado y el mapa observado. Esta comparación se basa únicamente en los cambios, ya que generalmente ambos mapas presentan mucha coincidencia debido a las áreas de permanencia (Paegelow & Camacho Olmedo, 2005). En este estudio, se llevó a cabo la comparación entre los mapas simulados y observados de 2005 y 2010 con base en un método de lógica difusa que permite manejar una cierta tolerancia cuando no existe una coincidencia perfecta. Este método consiste en hacer dos comparaciones, primero se define un área de tolerancia alrededor de los parches de los cambios simulados y se estima la coincidencia con los parches observados; así mismo, se define el área de tolerancia alrededor de los cambios observados y se evalúa la coincidencia con los simulados. Debido a que no es equiparable aplicar el área de tolerancia a los “parches” simulados o a los observados, se toma en cuenta el mínimo de los dos valores de coincidencia obtenidos. Para ello, se realizó esta operación con base en diferentes distancias de tolerancia (Mas & Flamenco-Sandoval, 2011): con base en la ventana de una celda o evaluación “dura”, donde sólo las coincidencias exactas (celda a celda) de los cambios entre los mapas simulado y observado son consideradas como correctas; y con base en la ventana más grande (una ventana de 95 celdas de lado equivale aproximadamente a una distancia de tolerancia de 712 m), donde la estimación de la coincidencia tolera cambios de posición entre los “parches” de cambio simulados y observados (Cuevas & Mas, 2008).

RESULTADOS

MONITOREO DE LOS CAMBIOS

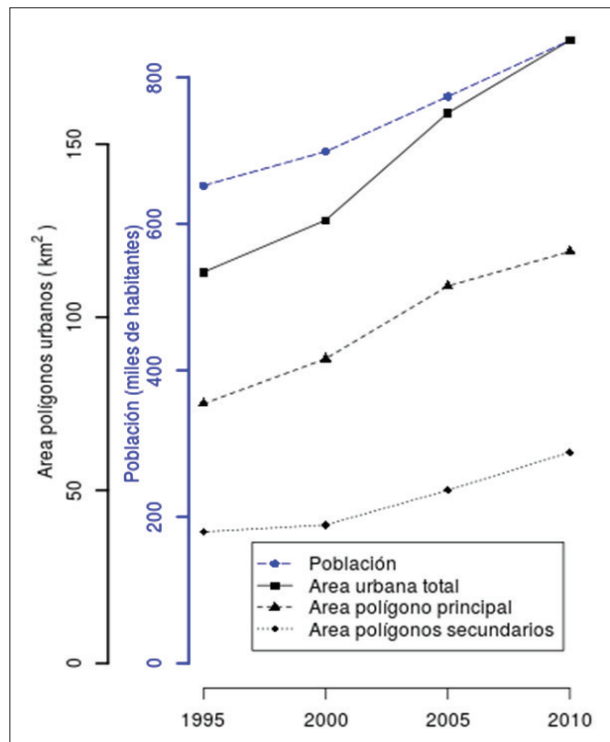
En las figuras 2 y 3 se puede observar que el crecimiento de la población y del área urbanizada muestran dinámicas aceleradas: Durante los periodos 1995-2000, 2000-2005 y 2005-2010, el área urbana aumentó 13.3%, 24.2% y 13.2%, respectivamente. Durante estos periodos la población se incrementó en 7.1%, 10.7% y 9.9%, respectivamente. De lo anterior se puede destacar que, durante 2000-2005, el crecimiento del área urbanizada fue mucho mayor que el poblacional.

Figura 2. Mapa de cambios por período quinquenal.



Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Crecimiento poblacional y urbano total por tipo de polígono.



Fuente: elaboración propia.

ENTRENAMIENTO DEL MODELO

El cálculo de las matrices de cambio y de probabilidades de transición arrojó los resultados que se muestran en las tablas 2 y 3.

Tabla 2. Matriz de cambio anual

Matriz anual (ha)			
	Área no urbanizada	Polígono principal	Polígonos secundarios
Área No Urbanizada	126,813	171	148
Polígono Principal	0	8,825	0
Polígonos Secundarios	0	98	3947

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Matriz de probabilidades de cambio anual (Matriz de Markov).

	Área no urbanizada	Polígono principal	Polígonos secundarios
Área No Urbanizada	0.9975	0.0013	0.0012
Polígono Principal	0.0000	1.0000	0.0000
Polígonos Secundarios	---	0.0242	0.9758

Fuente: elaboración propia.

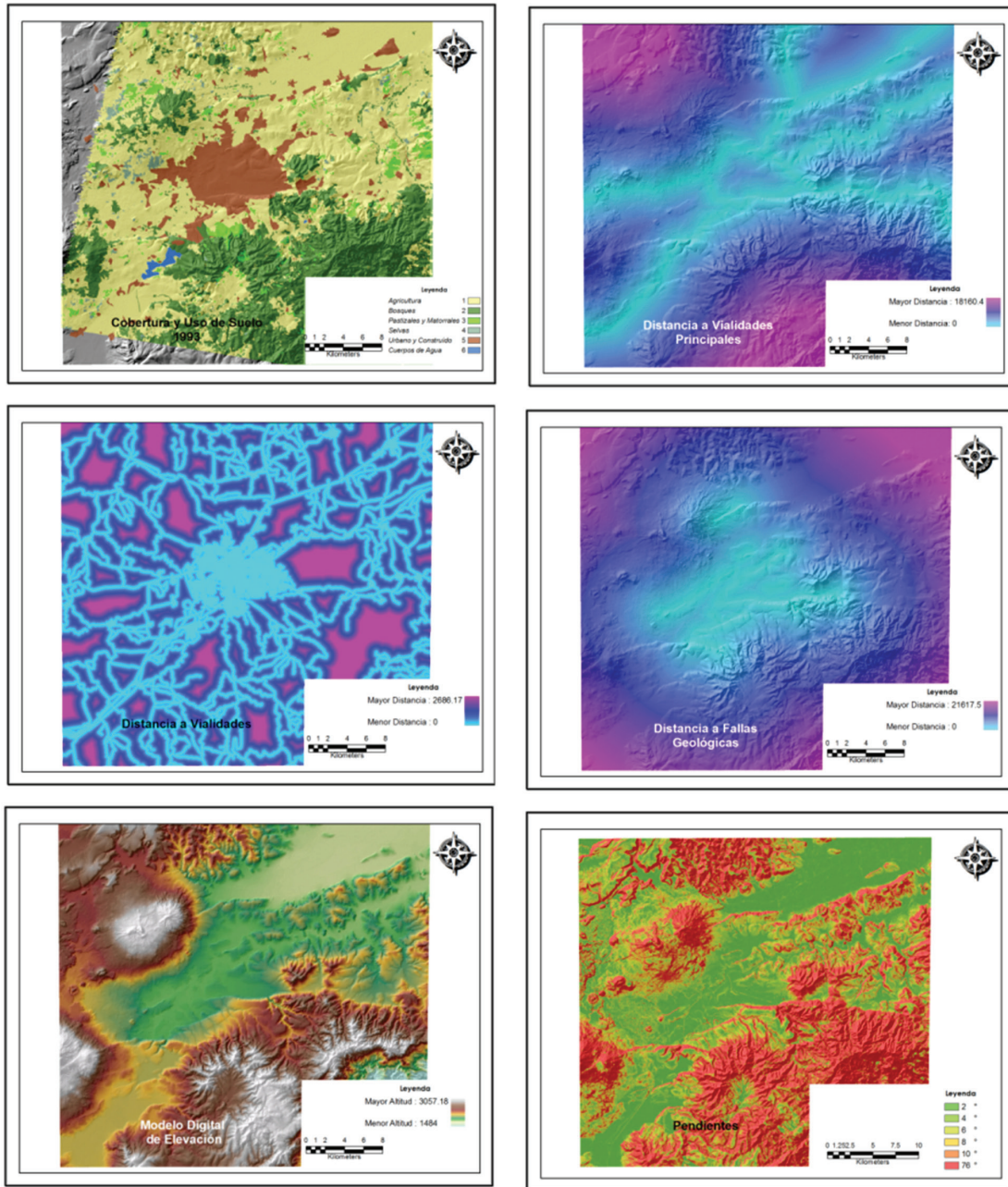
La matriz de cambio se elaboró para el período 1995-2000 y presenta tres transiciones: 1) crecimiento periurbano concéntrico cuando el polígono principal crece hacia zonas no urbanizadas, 2) crecimiento periurbano a partir de polos secundarios cuando los polígonos secundarios crecen hacia las zonas no urbanizadas, y 3) la incorporación de polígonos secundarios en el principal. Las tasas de cambio de las dos primeras transiciones se utilizaron para calcular la cantidad de cambio proyectado, ya que la tercera transición ocurre por la conexión de polígonos secundarios al principal y no por la urbanización.

VARIABLES EXPLICATIVAS

Las variables explicativas que se seleccionaron a partir del análisis de los pesos corresponden a tres grandes grupos: físicas, de zonificación urbana y económicas. Las variables explicativas físicas (figura 4) que se eligieron fueron el mapa de cubierta/uso del suelo 1993, el mapa de distancias a

vialidades principales, el mapa de distancias a todas las vialidades, el mapa de distancia a fallas geológicas, la elevación y la pendiente.

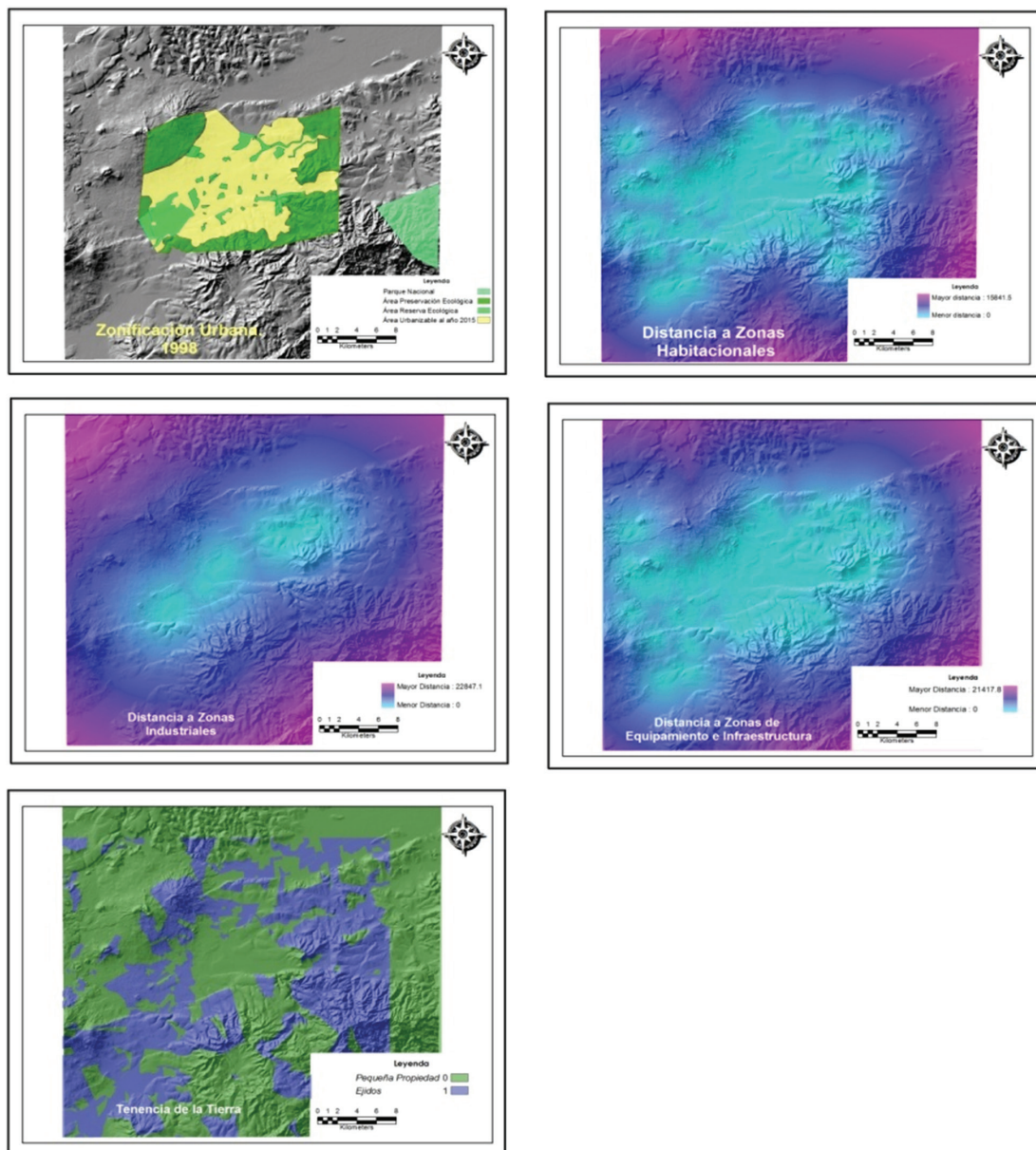
Figura 4. Variables explicativas físicas sobre relieve sombreado.



Fuente: elaboración propia.

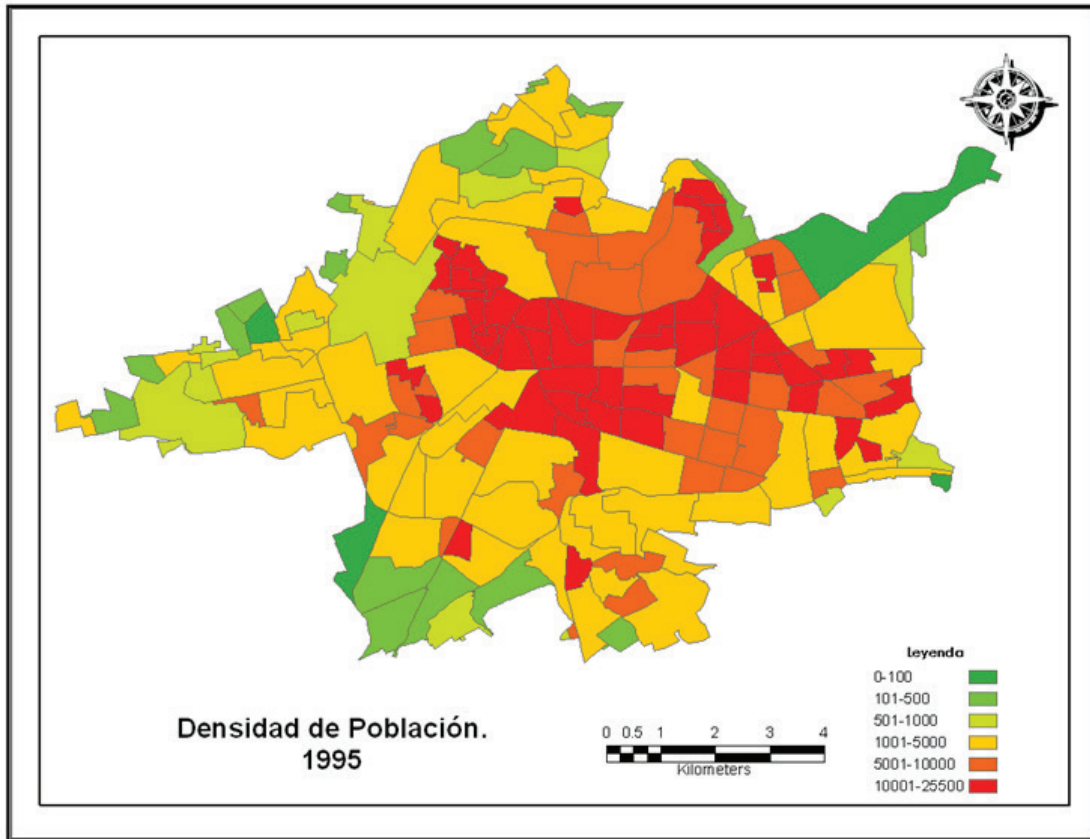
Las variables explicativas de zonificación urbana (figura 5) fueron: la zonificación urbana según el Plan de Desarrollo Urbano de 1998, el cual incluye el Área urbanizable al año 2015, zonas de preservación y reserva ecológica y un parque nacional, la distancia a zonas habitacionales, la distancia a zonas industriales, la distancia a equipamiento e infraestructura y la tenencia de la tierra. La variable explicativa demográfica que se utilizó fue la densidad de población del año 1995 (figura 6).

Figura 5. Variables explicativas de zonificación urbana sobre relieve sombreado.



Fuente: elaboración propia.

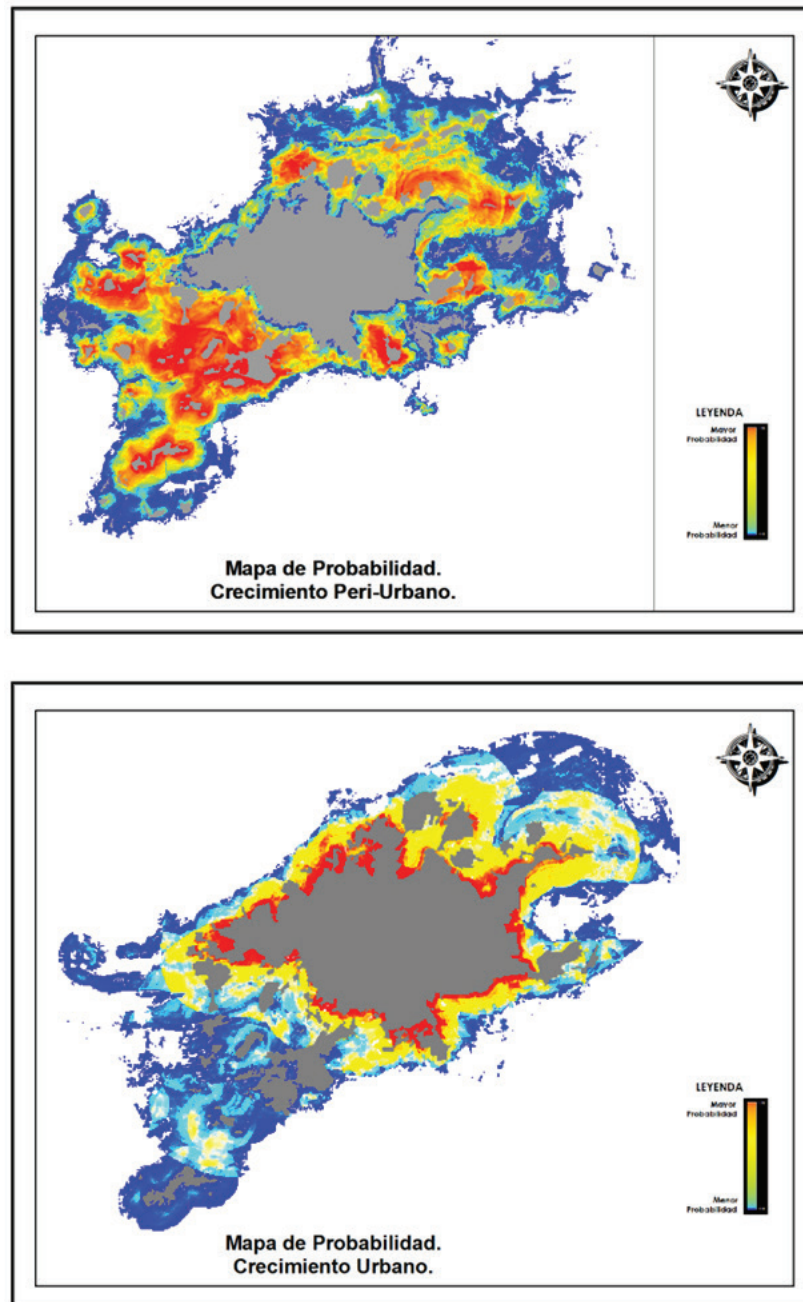
Figura 6. Mapa de densidad de población, 1995.



Fuente: INEGI (1995).

Entre la distancia a zonas habitacionales la distancia a equipamiento e infraestructura con la zonificación del Programa de Desarrollo Urbano 1998, se observaron valores de correlación moderados, únicamente para el caso de la transición de crecimiento periurbano (Índice de Cramer de 0.43 y 0.46). Considerando estas correlaciones moderadas, se conservaron estas variables en el modelo debido a que se asumieron como importantes. Con base en los pesos de evidencia definidos y corregidos, se produjeron los mapas de probabilidad para cada transición (figura 7).

Figura 7. Mapas de probabilidad de crecimiento periurbano y urbano.

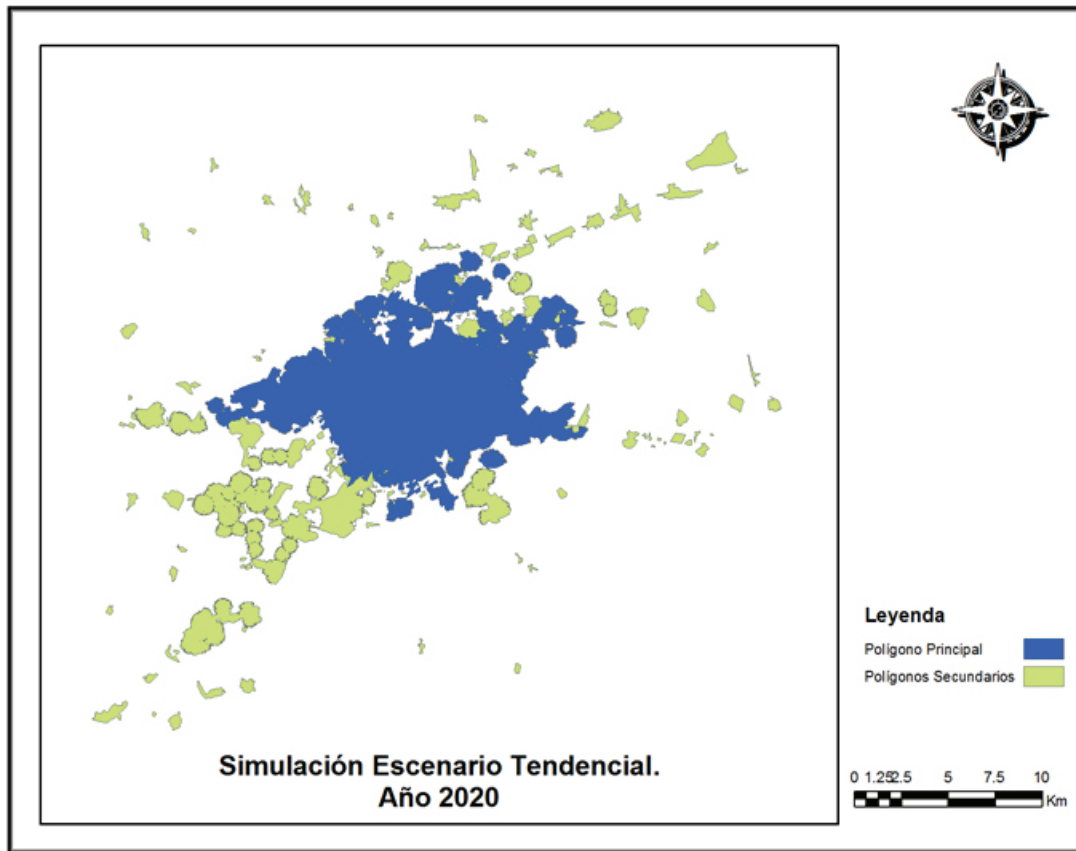


Fuente: elaboración propia.

ESCENARIO TENDENCIAL

Con los parámetros delimitados, el modelo se corrió para 20 años con base el mapa del 2000 simulando el área urbana para el año 2020 (figura 8). En este escenario, la ciudad continuará creciendo con las tasas observadas durante el periodo 1995-2000 a un ritmo desacelerado, debido a que cada año el crecimiento es proporcional a un área menor. El crecimiento ocurre en zonas cercanas a los polígonos de origen.

Figura 8. Mapa prospectivo 2020 “Escenario Tendencial”.

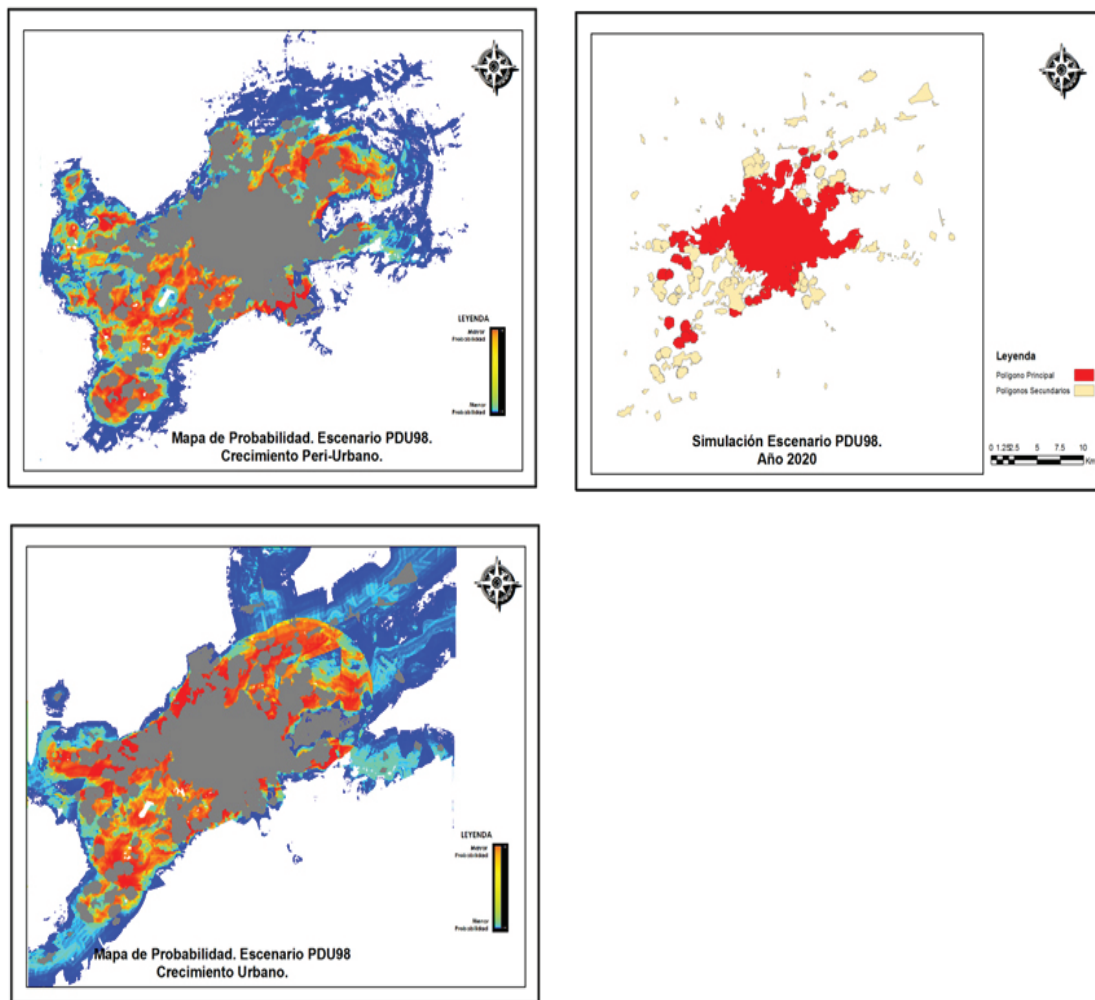


Fuente: elaboración propia.

ESCENARIO PDU 1998

El escenario PDU 1998 simula también los cambios con base en la tasa 1995-2000, limitando el crecimiento urbano a las zonas en donde el Plan tenía considerado dicho crecimiento (figura 9).

Figura 9. Simulación “Escenario PDU 1998”



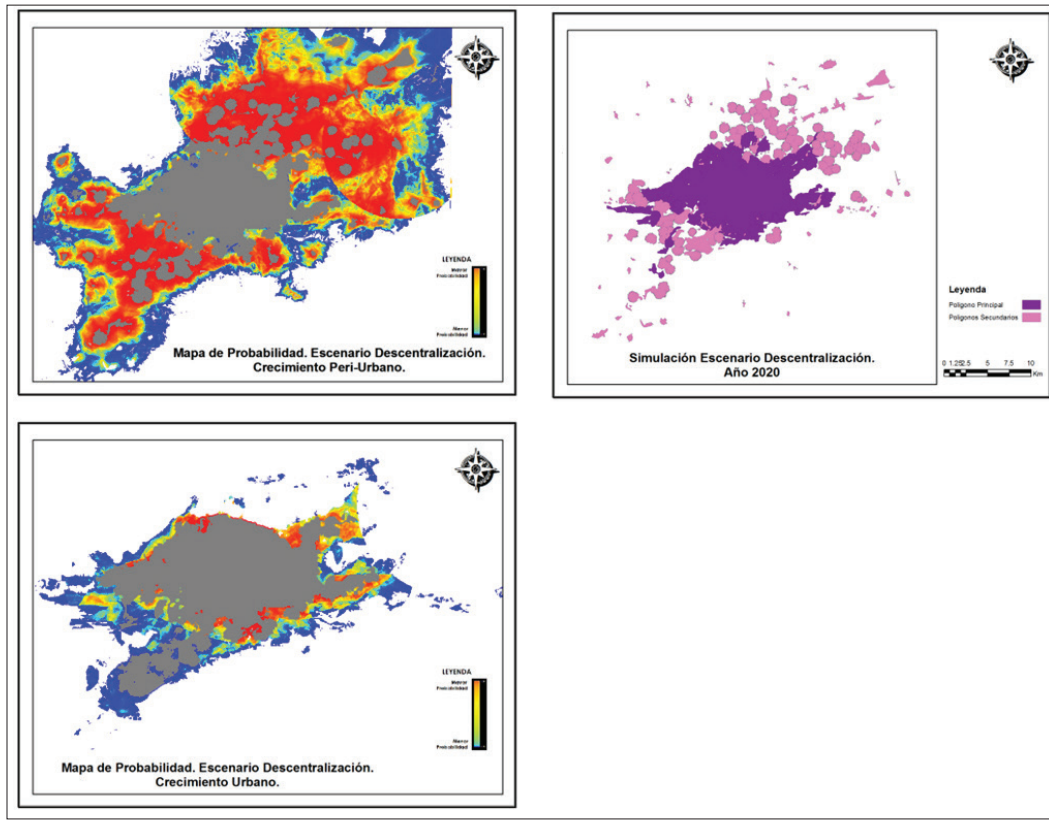
Fuente: elaboración propia.

ESCENARIO “DESCENTRALIZACIÓN”

El escenario Descentralización se base en tasas de crecimiento mayores a los dos escenarios anteriores. El crecimiento ocurre en las zonas de descentralización, alrededor de los polos de atracción (figura 10).

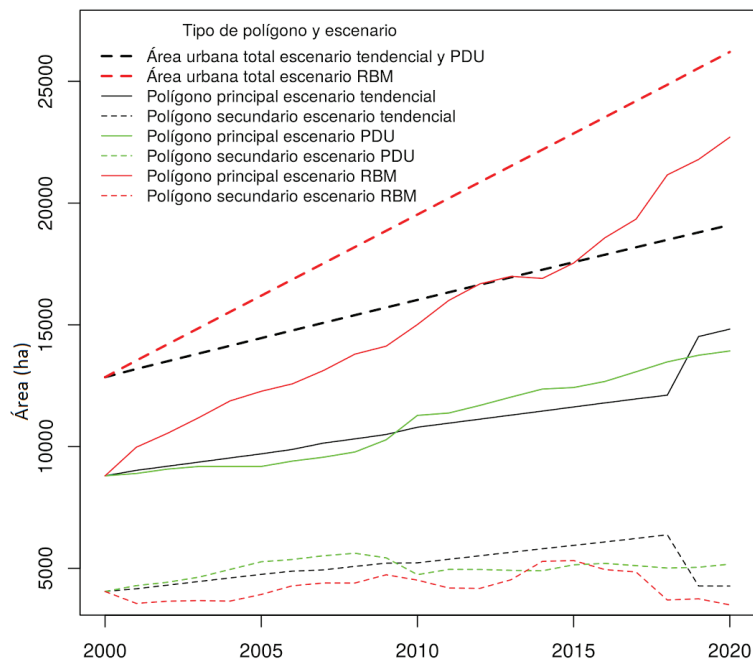
En la figura 11, se observa el crecimiento superficial del área urbana en los diferentes escenarios. El área total de los polígonos secundarios presenta bajas cuando grandes polígonos secundarios se incorporan al polígono principal.

Figura 10. Simulación “escenario descentralización”.



Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Crecimiento de las áreas urbanas con base en los diferentes escenarios.



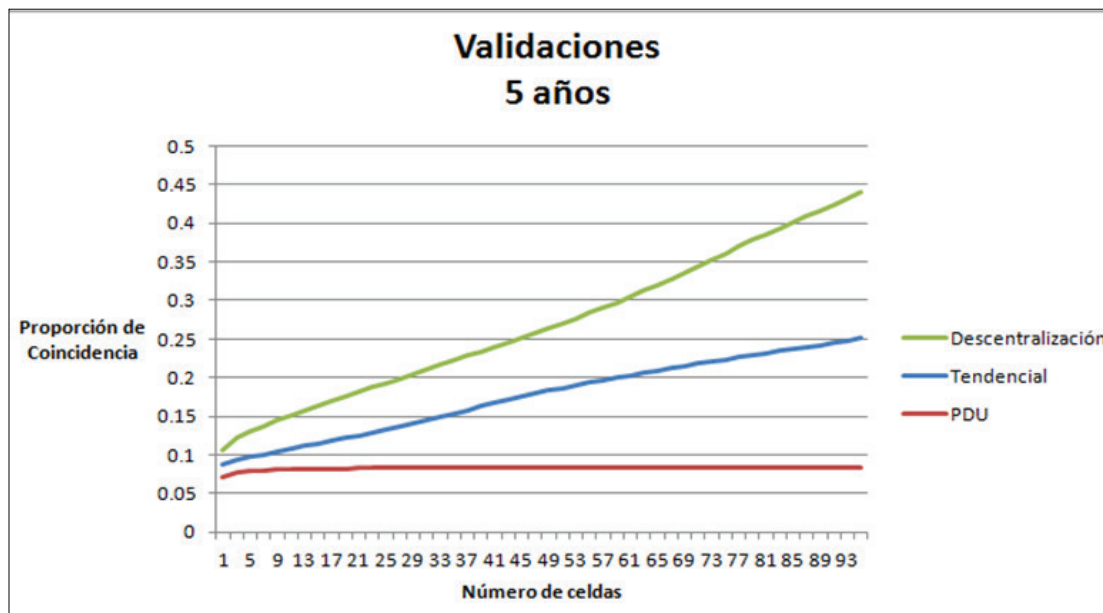
Fuente: elaboración propia.

VALIDACIÓN DEL MODELO

Para evaluar el desempeño del modelo se calculó la coincidencia difusa entre los cambios observados y los cambios simulados para los periodos 2000-2005 y 2000-2010 para los tres escenarios desarrollados, utilizando distancias de tolerancia de 0 a 700 m (figuras 12 y 13).

En la figura 12 se puede observar que la coincidencia espacial del mapa prospectivo a 2005 con base en el escenario apegado al Programa de Desarrollo Urbano 1998 (PDU) es la que menos coincide con el mapa observado en 2005. La coincidencia del escenario Tendencial (que llega hasta 0.25) tiene una similitud intermedia. El mapa simulado a 2005 con el escenario Descentralización es el más cercano al mapa observado para 2005, con valores de coincidencia de hasta 0.43.

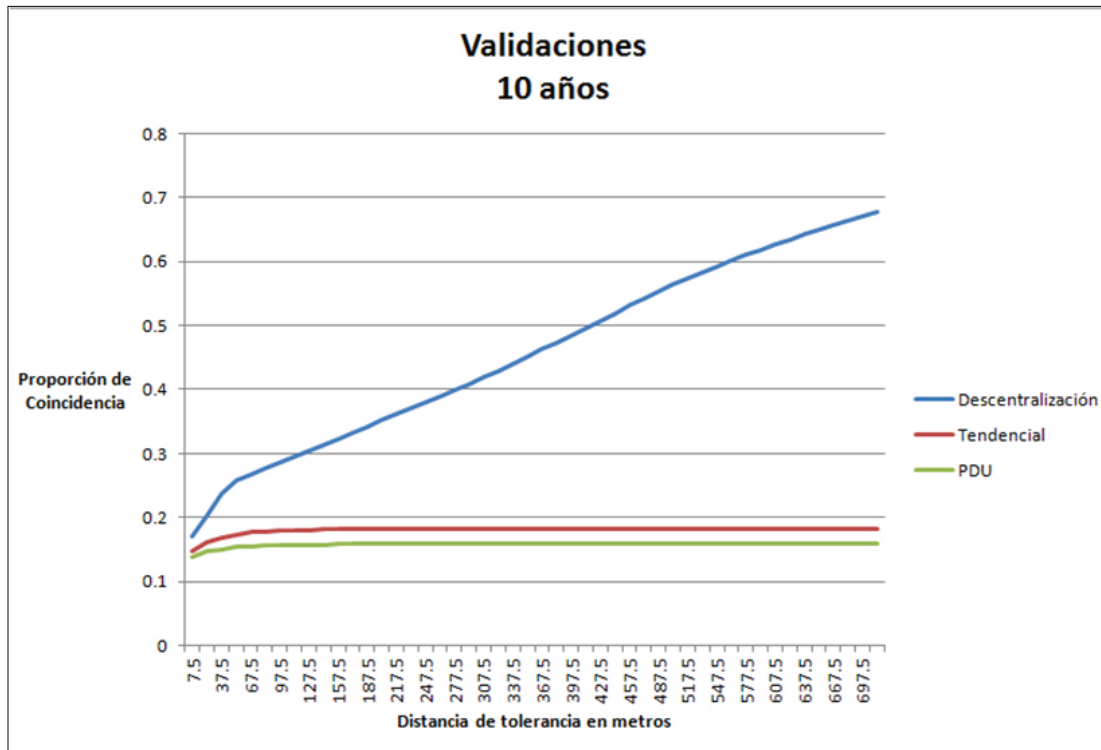
Figura 12. Evaluación de escenarios a 5 años.



Fuente: elaboración propia.

La figura 13 muestra las mismas tendencias para el año 2010: Los mapas simulados con los escenarios PDU98 y Tendencial presentan una coincidencia baja con el mapa observado de 2010 (valores menores a 0.20) mientras que el mapa del escenario Descentralización presenta coincidencias de hasta 0.68. Este último escenario presenta un mejor desempeño debido a que: 1) su tasa de crecimiento es más cercana a la observada durante el periodo 2000-2010 y, por lo tanto, la superficie de crecimiento urbano simulado se acerca más a la realidad y, 2) la localización de las áreas urbanizadas simuladas alrededor de los polos de descentralización son más acertadas que los demás modelos basados en un crecimiento concéntrico a partir de la ciudad de Morelia exclusivamente.

Figura 13. Evaluación de escenarios a 10 años.



Fuente: elaboración propia.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Con base en la comparación entre el Programa de Desarrollo Urbano vigente en el período de análisis y los mapas del crecimiento real de la ciudad de Morelia, se observa que el patrón de crecimiento ha sido desordenado, pues la ciudad no sólo irrumpió en las zonas de protección y reserva ecológica planteadas originalmente por el Programa, sino que además utilizó zonas de transición entre las zonas urbanas y las rurales, que tampoco estaban consideradas para crecimiento urbano.

Las variables que propiciaron el crecimiento de la ciudad fueron: la cercanía a las zonas habitacionales, vialidades, zonas industriales y al polígono principal. Por el contrario, las elevaciones fisiográficas y las pendientes pronunciadas limitaron el crecimiento. Consecuentemente, el patrón de crecimiento de la ciudad tiene una clara dirección de expansión Noreste-Suroeste, limitado principalmente por la cercanía de los cerros del Quinceo (al noroeste) y el Punhuato (al sureste).

En la comparación entre los crecimientos, poblacional y de la superficie de la ciudad (figura 3), se observa que la modelación se complica porque éstos no están correlacionados. Los dos primeros escenarios basados en el crecimiento tendencial observado antes del 2000 subestiman el área urbanizada. Esto se explica porque en el año 2000 con la política de vivienda del gobierno de Vicente Fox, se otorgaron facilidades a empresas particulares para la construcción de desarrollos

habitacionales, lo que ocasionó un proceso de aceleración en la construcción de fraccionamientos de interés social (bajo, medio y alto). La vivienda construida en serie para abatir costos de producción fue financiada por parte del Estado, ocasionando un cambio en las tendencias de crecimiento, además de que los asentamientos informales con autoconstrucción de vivienda siguieron proliferando.

En el escenario “Descentralización” se aumentó la tasa de crecimiento y se agregó como variable explicativa la presencia de los polos de atracción, que son las cabeceras municipales de los municipios colindantes con mayores niveles de conurbación, y las relaciones funcionales intensas con la ciudad de Morelia. Este escenario tiene un mejor desempeño de similitud del 10% al 43% a 5 años, y del 17% al 68% a 10 años. Mientras que, el escenario “PDU 1998” es un escenario optimista que presenta el índice de coincidencia más bajo porque se apega al Programa de Desarrollo Urbano vigente en el período de análisis, el cual no se respetó en la realidad.

En el crecimiento periurbano de la ciudad de Morelia se pueden observar algunos de los esquemas analizados en otras partes del mundo: El crecimiento fue más notorio a partir del año 2000, año en que, como ya se mencionó, dio inicio la política de vivienda que permitió que particulares fraccionaran y construyeran zonas habitacionales y de infraestructura en las zonas periféricas de la ciudad, en donde había grandes extensiones de suelo y a menores precios que en el centro. En algunos casos, estas extensiones de terreno fueron zonas de transición y en otros fueron zonas rurales (ejidales), lo cual favoreció que las dos tendencias de periurbanización que prevalecen en el mundo se presenten en el crecimiento de la ciudad de Morelia.

Por un lado, la tendencia de la difusión urbana y la discontinuidad física de la misma (Dubois-Taine & Chalas, 1997; Banzo, 2005) tiene ejemplos evidentes en fraccionamientos como El Trébol y Montaña Monarca que están ubicados en el municipio de Tarímbaro (con viviendas para clases sociales medias y medias bajas); o en fraccionamientos como Villas del Pedregal y Villa Magna, ambos conjuntos habitacionales de gran magnitud que concentran hasta 10,000 viviendas (carentes de equipamiento y servicios) en espacios periurbanos al poniente de la ciudad de Morelia; Así mismo, los fraccionamientos Tres Marías (al oriente) y Altozano (al sur de la ciudad pero dentro de los límites del municipio) tienen secciones de vivienda para clases sociales medias altas y altas, además de obras de equipamiento e infraestructura, tales como centros de trabajo, educativos, de salud y de diversión de alto nivel, que incentivan la expansión de la ciudad hacia esa zona.

Por otro lado, se observa la tendencia definida por la extensión continua de la ciudad y la absorción paulatina de los espacios rurales que la rodean (Ávila, 2001). Esta tiene sus ejemplos en poblaciones como: San Nicolás Obispo o Tenencia Morelos (dentro del municipio de Morelia) cuyo crecimiento natural se ha integrado a la ciudad. Mención aparte merecen las zonas de asentamientos irregulares como la colonia Tierra y Libertad (hacia el norte de la ciudad), la cual está

casi totalmente urbanizada y con infraestructura, pero en sus inicios fue irregular; o Ciudad Jardín (al poniente de la ciudad), que aún es irregular. Es evidente que hay muchas colonias, fraccionamientos y asentamientos que también ejemplifican lo anterior, pero éstos son algunos de los más representativos en las formas y tipos de asentamientos que ejemplifican los casos del crecimiento de la ciudad.

Por otra parte, la segregación geográfica de las zonas habitacionales es otro fenómeno que se aprecia de forma cada vez más evidente, ya que las áreas de vivienda de clase media y media alta se desarrollan hacia el sur y oriente, mientras que las de clase media baja y baja, lo hacen hacia el norte y el poniente.

De la misma manera que Aguilar y Mateos (2011) lo observaron en la Ciudad de México, en donde notaron rasgos del modelo de segregación, como la persistencia de las clases altas hacia ciertos espacios, y los estratos proletarios y las clases medias hacia otros, se observa también en la ciudad de Morelia, como consecuencia del modelo de desarrollo urbano imperante en América Latina, lo que también evidencia una marcada dispersión y polarización socioeconómica.

Al estudiar la evaluación de los patrones de crecimiento periurbano de la ciudad de Morelia de las últimas dos décadas, se hace referencia al análisis que Borsdorf (2003) determina del crecimiento urbano de la ciudad latinoamericana. El período al que el autor llama la ciudad fragmentada, es el que nos incumbe directamente, pues está dentro del período de la investigación realizada, pero esta fragmentación se pone de manifiesto en el hecho de que Morelia ya sea considerada una Zona Metropolitana (Sedesol, Conapo, & INEGI, 2012), por incluir los municipios colindantes de Charo, Tarímbaro y Álvaro Obregón, pero sobre todo, esta fragmentación se hace evidente al observar el crecimiento de la ciudad en la interpretación visual realizada.

Para evaluar los alcances del modelo se hizo un análisis de las figuras comparativas de las validaciones, con lo que se pudo determinar que el modelo puede alcanzar una eficiencia de casi el 70% si se identifican las variables que afectan los cambios tales como las zonas habitacionales, las zonas industriales y el polígono principal, en donde se observaron cambios importantes; por el contrario, en las zonas cuyo relieve presenta elevaciones altas, no se observan grandes transformaciones.

Debido entonces a que plantea opciones de crecimiento espacial a manera de escenarios (el Tendencial, el que se apega al PDU 1998 y el que propone Polos de Desarrollo-Descentralizado), este modelo es un instrumento para la toma de decisiones en la planificación urbana, útil a nivel municipal o estatal, que puede ser integrado en futuros Planes de Desarrollo Urbano para dirigir el crecimiento físico y funcional de la ciudad.

AGRADECIMIENTOS

La primera autora agradece al CONACYT por la beca de posgrado que le permitió realizar la maestría de Manejo Integrado del Paisaje en el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental de la UNAM. El presente estudio se llevó a cabo en el ámbito del proyecto SEP-CONACYT 178816: *¿Puede la modelación espacial ayudarnos a entender los procesos de cambio de cobertura/uso del suelo y de degradación ambiental?*

REFERENCIAS

- Aguilar, A., & Mateos, P. (2011). Diferenciación sociodemográfica del espacio urbano de la Ciudad de México. *Eure*, 37 (110), 5-30.
- Aguilera-Benavente, F., & Talavera-García, R. (2009). Valoración de escenarios futuros a través de la conectividad del paisaje. *Observatorio Medioambiental*, (12), 17-36.
- Aguilera-Benavente, F., Valenzuela-Montes, L., & Bosque-Sendra, J. (2010). Simulación de escenarios futuros en la aglomeración urbana de Granada a través de modelos basados en Autómatas Celulares. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (54), 271-300.
- Aguilera-Benavente, F., Valenzuela-Montes, L., & Botequilha-Leitão, A. (2011). Landscape metrics in the analysis of urban land use patterns: A case study in a Spanish metropolitan area. *Landscape and Urban Planning*, (99), 226-238.
- Almeida, C. (2003). *Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento: simulação de mudanças de uso da terra em áreas urbanas para as cidades de Bauru e Piracicaba* (tesis de doctorado). INPE, Brasil.
- Almeida, C., Vieira, A.M., Câmara, G., Soares-Filho, B.S., Coutinho, G., Lopes, C., & Batty, M. (2005). GIS and remote sensing as tools for the simulation of urban land-use change. *International Journal of Remote Sensing*, 26 (4), 759-774
- Ávila, H. (2001). Ideas y planteamientos teóricos sobre los territorios periurbanos. Las relaciones campo-ciudad en algunos países de Europa y América. *Investigaciones Geográficas*, (45), 108-127.
- Banzo, M. (2005). Del espacio al modo de vida. La cuestión periurbana en Europa Occidental: Los casos de Francia y España. En H. Ávila, *Lo Urbano-Rural, ¿Nuevas Expresiones Territoriales?* (pp. 208-216). Cuernavaca, Morelos, México: Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, UNAM.
- Barredo, J., Demicheli, L., Laval, C., Kasanko, M., & McCormick, N. (2004). Modelling future urban scenarios in developing countries: an application case study in Lagos, Nigeria. *Environment and Planning B: Planning and Design*, (32), 65-84.
- Barredo, J., Kasanko, M., McCormick, M., & Laval, C. (2003). Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through celular automata. *Landscape and Urban Planning*, (64), 145-160.
- Barreira-González, P., Aguilera-Benavente, F., & Gómez-Delgado, M. (2012). Propuesta de un análisis de sensibilidad para validar modelos prospectivos de simulación de crecimiento urbano basados en autómatas celulares. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica (Geofocus)*,

- (12), 303-328.
- Batty, M., Xie, M.Y., & Sun, Z. (1999). Modelling urban dynamics through GIS-based cellular automata. *Computers, Environment and Urban Systems*, 23, 205-233.
- Bonham-Carter, G. (1994). *Geographic Information Systems for Geoscientist. Modelling with GIS*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Borsdorf, A. (2003). Cómo modelar el desarrollo y la dinámica de la ciudad latinoamericana. *EURE*, 29 (86), 37-49.
- Cuevas, G., & Mas, J. F. (2008). Land use scenarios: a communication tool with local Communities. En M. P. Camacho, *Modelling Environmental Dynamics* (pp. 223-246). Springer-Verlag.
- Dematteis, G. (1998). Suburbanización y periurbanización. Ciudades anglosajonas y ciudades latinas. En F. J. Monclús (edit.), *La ciudad dispersa* (pp. 17-33). Barcelona, España: Centre de Cultura Contemporània de Barcelona.
- Dubois-Taine, G., & Chalas, Y. (1997). *La ville émergente*. La Tour d'Aigues: éd. de l'Aube.
- FAO (1996). *Forest resources assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes*. Rome: Food and Agriculture Organization forestry paper 130.
- García, A., Santé, I., Crecente, R., & Miranda, D. (2011). An analysis of the effect of the stochastic component of urban cellular automata models. *Computers, Environment and Urban Systems*, (35), 286-296.
- Gómez-Delgado, M., & Barredo, J. (2005). *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la ordenación del territorio* (2a. ed.). Paracuellos de Jarama: Ra-Ma.
- Hansen, H. (2010). Modelling the future coastal zone urban development as implied by the IPCC SRES and assessing the impact from sea level rise. *Landscape and Urban Planning*, (98), 141-149.
- IMDUM (1998). *Programa de Desarrollo Urbano de Morelia (Actualización 1998)*. Morelia: H. Ayuntamiento de Morelia 1996-1998.
- IMDUM (2010). *Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Morelia 2010*. Morelia, Mich.: H. Ayuntamiento de Morelia.
- INEGI (1995). *Conteo de Población y Vivienda*. México: INEGI.
- INEGI (2010). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx>
- Liu, X., & Andersson, C. (2004). Assessing the impact of temporal dynamics on land-use change modeling. *Computers, Environment and Urban Systems*, 1-2 (28), 107-124.
- López, E., Bocco, G., Mendoza, M., & Duhau, E. (2001). Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe: A case in Morelia city, Mexico. *Landscape and Urban Planning*, 55 (4), 271-285.
- Mas, J.F., & Flamenco-Sandoval, A. (2011). Modelación de los cambios de coberturas/uso del suelo en una region tropical de Mexico. *GeoTrópico*, 5 (1), 1-24.
- Mas, J.F., Kolb, M., Paegelow, M., Camacho-Olmedo, M., & Houet, T. (2014). Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages. *Environmental Modelling & Software*, 94-111.
- Mitsova, D., Shuster, W., & Wang, X. (2011). A cellular automata model of landcover change to integrate urban growth with open space conservation. *Landscape and Urban Planning*, (99), 141-153.
- Paegelow, M., & Camacho-Olmedo, M. (2005). Possibilities and limits of prospective GIS land cover

- modelling - a compared case study: Garrotxes (France) and Alta Alpújarra Granadina (Spain). *International Journal of Geographical Information Science*, 19 (6), 697-722.
- Paegelow, M., & Camacho-Olmedo, M. (2008). *Modelling environmental dynamics*. Berlin: Springer-Verlag.
- Paniagua, I., Cárdenas, J., & Ramírez, I. (2011). Método Híbrido para la Detección de Cambios en la Cubierta de Suelo en Áreas Naturales Protegidas. *Memorias de la XIX Reunión Nacional SELPER*. Morelia, Mich.
- Plata-Rocha, W., Gómez-Delgado, M., & Bosque-Sendra, J. (2011). Simulating urban growth scenarios using GIS and Multicriteria Evaluation techniques. Case study: Madrid Region, Spain. *Environment and Planning B. Planning and Design*, 38 (6), 1012-1031.
- Rossetti, L., Almeida, C., & Pinto, S. (2013). Análise de mudanças no uso do solo urbano e rural com a aplicação de modelagem dinâmica espacial. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2013*, (págs. 6316-6323). Foz do Iguaçu.
- Santé, I., García, A., Miranda, D., & Crecente, R. (2010). Cellular autómatas models for the simulation of real world urban processes: A review and analysis. *Landscape and Urban Planning*, (96), 108-122.
- Sedesol, Conapo, & INEGI. (2012). *Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2010*. Aguascalientes, Ags.: Sedesol, Conapo, INEGI.
- Sudhira, H.S., Ramachandra, T.V., & Jagadish, K.S. (2004). Urban sprawl: metrics, dynamics and modelling using GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5, 29-39.
- Soares-Filho, B. (1998). *Modelagem da dinâmica de paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica*. Sao Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Soares-Filho, B., Pennachin, C., & Cerqueira, G. (2002). DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling*, 154 (3), 217 – 235.
- Soares-Filho, B., Rodrigues, H., & Costa, W. (2009). *Modelamiento de Dinámica Ambiental con Dinamica EGO*. Obtenido de Centro de Sensoriamento Remoto/Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Brasil. Recuperado de <http://www.csr.ufmg.br/dinamica/>
- UNESCO (1999). *Ciudades intermedias y urbanización mundial*. Lleida, España: Ajuntament de Lleida, UNESCO, UIA, Ministerio de Asuntos Exteriores.
- Verburg, P., Schot, P., Djist, M., & Veldkam, A. (2004). Land Use change modeling: current practice and research priorities. *Geojournal*, (61), 309-324.
- Vieyra, A., & Larrazabal, A. (2009). *Urbanización y Precariedad Urbana en la Ciudad de Morelia, Mich*. Ponencia, XII Encuentro de Geógrafos de América Latina, Montevideo.

EL ESTUDIO DEL RIESGO URBANO

EL ENFOQUE CRÍTICO DEL ANÁLISIS GEOESPACIAL. DECONSTRUYENDO LA
VULNERABILIDAD EN UNA COMUNIDAD AFECTADA POR INUNDACIONES EN LA
CIUDAD DE MORELIA

Frida Gúiza Valverde y Michael K. McCall*

INTRODUCCIÓN

El desarrollo informático combinado con los sistemas de análisis geoespacial y los sistemas de posicionamiento espacial (GPS), se integran cada vez más en la vida cotidiana a través de las tecnologías móviles, las cuales tienen el potencial de encauzar la acción social, además de cuestionar lo que una vez fue conocimiento inaccesible y de expertos (Wood, 2003). Los enfoques contemporáneos sobre las nuevas tecnologías revelan la capacidad democratizadora de la información y promotor de una cultura cívica basada en la participación horizontal, así como la potencial ampliación de los espectros de intervención en el diseño y la toma de decisiones públicas. La informática y los sistemas de información geográfica integrados en los dispositivos de comunicación, tienen la capacidad de convertirse en vías de empoderamiento de grupos marginales y ciudadanos en general.

Por primera vez en la historia de la humanidad, más de la mitad de la población habita en zonas urbanas lo cual plantea retos de diferente índole; todo pasa en la ciudad sugiere Harvey (2003). Asimismo, la naturaleza heterogénea de la ciudad implica la creación de redes de interés diversas,

* Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, fguiza@ciga.unam.mx y mccall@ciga.unam.mx

la ciudad se vuelve el centro de las disputas de poder, de recursos materiales, de conflictos por el espacio, de la individualidad; como también es el lugar de creación, de diversidad cultural, de comunidad.

Las comunidades (vecinales, de interés, de práctica, simbólicas etcétera) se han beneficiado con los instrumentos tecnológicos y el desarrollo científico, los cuales son ampliamente usados en contextos urbanos/rurales con objetivos variados, desde la respuesta a emergencias por desastres, contaminación urbana, reportes de violencia personal y social, mercadotecnia, protestas políticas así como actividades de ocio.

En nuestro caso, el interés de este trabajo se centra en el monitoreo y respuesta a desastres en la ciudad de Morelia, una ciudad media (con más de un millón de habitantes). En este trabajo se reúne la experiencia del diseño y uso de un prototipo de plataforma web, con la cual se pretende la interacción horizontal entre los afectados por inundaciones, las autoridades encargadas de responder a emergencias, las ONG y los académicos. La inclusión del GPS y el intercambio en tiempo real entre diferentes usuarios de dispositivos móviles y aplicaciones para celular y plataformas web (*facebook, tweeter*), permite la validación de la información dando voz a aquellos que sufren los impactos negativos de un evento natural, y que la mayoría de las veces corresponden a los sectores con los ingresos más bajos, como es el caso aquí presentado.

En este trabajo también presentamos una serie de plataformas realizadas en diferentes ciudades del mundo. Los ejercicios aparentemente sencillos, promovidos por ONG, comunidades virtuales, o grupos de ciudadanos (*grassroot*) interesados, han logrado generar cambios en los espacios donde habitan. Queremos poner a la disposición de los académicos y público interesado ideas implementadas en otras partes del mundo, para generar una masa crítica que desarrolle acciones independientes como alternativas en la toma de decisiones de las estructuras gubernamentales o comerciales.

Este capítulo está organizado de la siguiente manera: en primera instancia hacemos una revisión de la evolución del enfoque crítico del análisis geoespacial; posteriormente describimos el caso desarrollado en el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA), el cual probó un prototipo de plataforma de uso libre para el monitoreo y respuesta a emergencias por desastres naturales, particularmente inundaciones, en una zona afectada periódicamente por estos fenómenos. También se describen algunas plataformas que se han desarrollado en diferentes ciudades con temas ambientales urbanos, y; concluimos este capítulo con un glosario que presenta las distinciones fundamentales entre enfoques y conceptos clave.

LA PERSPECTIVA CRÍTICA DEL ANÁLISIS GEOESPACIAL

Durante la última parte de la década de los 1980 y 1990 la perspectiva crítica de la geografía veía

con recelo el desarrollo técnico y comercial del SIG (Sheppard, 2005; Pickeles, 1995), acaloradas discusiones sobre el uso militar de los SIG, la comercialización del conocimiento y el control del conocimiento por expertos (Wood, 2003), dio un giro radical en la primera década del dos mil con la ciencia ciudadana y la neo-geografía. Disciplinas que analizan la incorporación del desarrollo tecnológico innovador en teléfonos celulares y en la web, con los SIG (Carr, 2010; Goodchild, 2007; Manovich, 2007).

En años recientes, los esfuerzos se dirigen a promover la participación horizontal y libre de los ciudadanos, particularmente los de más bajos ingresos con limitado acceso a los beneficios sociales y las decisiones públicas. Este enfoque evalúa la utilidad de la integración de diferentes áreas del conocimiento en dispositivos de fácil acceso y baratos, así como la amigabilidad de los lenguajes de programación, que permiten la creación de redes basadas en temas y preocupaciones que surgen desde los usuarios. Llamen la atención aquellas plataformas y aplicaciones con temáticas que intentan incidir en la sociedad y que se ocupan de problemas políticos, ambientales o de cambio de uso de suelo, entre muchos otros (Elwood, 2008; Elwood, Goodchild, & Sui 2013; Connors, Lei, & Kelly, 2012; Zook, Graham, Shelton, & Gorman, 2010).

Los mensajes transmitidos por estos medios y expuestos públicamente desinvisibilizan a los grupos marginales, convirtiéndose en mecanismos de presión y comunicación entre los sectores afectados o beneficiados por fenómenos específicos. La democratización de las tecnologías (García, 1995), promovida por el acceso fácil a dispositivos móviles como celulares y tabletas, y el desarrollo de software por *expertos no formales* han permitido la creación de plataformas web pensadas desde los ciudadanos para cubrir las necesidades de los ciudadanos. El reto siguiente para estas plataformas y aplicaciones es establecer comunicación de doble vía (mensaje-respuesta) entre los diferentes agentes, además de la integración de los SIG y el GPS con el fin de lograr una verdadera incidencia en el diseño y distribución de los beneficios de las decisiones públicas.

El caso de estudio de este trabajo tiene como eje analítico la perspectiva teórica crítica de los sistemas de análisis geoespacial. Este enfoque asume como postura ética la promoción de la participación y la cooperación entre diferentes agentes para intervenir y dar solución a un problema real, sin intentar imponer un solo punto de vista. La apuesta es analizar y cuestionar el discurso de la neutralidad de sistemas para el análisis espacial como espejo de la realidad, también examina la relación biunívoca entre el poder y el conocimiento materializado en la tecnología.

La visión crítica engancha a los tecnólogos en debates teóricos sobre los impactos sociales, políticos y tecnológicos de las herramientas y el conocimiento experto (Latour & Weibel, 2005; Foucault, 2007). La geografía humana y la ciencia social en general, desde la perspectiva crítica, contribuyen en estas discusiones con temas como la construcción del espacio, el impacto de las interacciones de la gente con las tecnologías, y la reconfiguración de los agentes políticos y sociales

a partir del uso cotidiano de los SIG y las redes de comunicación. Debate al que tendrían que estar dispuestos a problematizar los expertos en los SIG, empezando por distinguir los componentes políticos de la parte técnica (Pickles, 1991; Smith, 1992); así como en examinar los discursos que el análisis geoespacial y sus instrumentos enactan, construyendo la supuesta neutralidad científica, además de la representación de la realidad (Foucault, 1968).

El enfoque crítico del análisis geoespacial sugiere que, con las herramientas cartográficas, es posible incidir en el cambio social, dado que permite la producción de conocimiento situado en un contexto social (Foucault, 2007, 1968; Latour, 2005), el cual es utilizado como una forma de participación de diferentes agentes en el diseño de las decisiones públicas. La creciente ubicuidad de los mapas altera de manera significativa la producción de los mismos, ya no están solo en las manos de los expertos, la enorme disponibilidad de información en las redes sociales permite la creación de mapas por usuarios no expertos, de acuerdo con sus necesidades.

Holbraad (2011) sugiere que la gente actúa y habla usando los objetos, por tanto el poder de los objetos está en función de las nociones que estos enactan (Foucault, 1968). Los artefactos contribuyen con nuestra humanidad y sus cualidades proveen de elementos cruciales que invisten a diferentes agentes con poder (Holbraad, 2011). Los objetos respaldan niveles jerárquicos, y un orden social dentro del sistema (Latour, 2005). En concordancia con la herencia Foucaultiana la ciencia y la tecnología implican un ejercicio del poder sobre aquellos que no tienen el conocimiento, las habilidades y los instrumentos para entenderla (Sillar, 2009; Latour, 2005; Holbraad, 2011; Foucault, 1968). En este sentido, las tecnologías avanzadas influyen las prácticas de los usuarios. Los conocimientos científicos sofisticados y sus instrumentos se vuelven cajas negras, de las que los usuarios finales o los receptores de los resultados de este conocimiento tienen una noción muy vaga o nula. Por tanto, cuando se cuestiona una decisión que afecta/beneficia a la sociedad, el ciudadano común no cuenta con los elementos técnicos ni la jerga necesaria para hacerse escuchar.

Los avances en los SIG en las últimas décadas han sido tan vertiginosos que se han integrado en las diferentes áreas del conocimiento y de la vida social. Las perspectivas más actuales promueven la ruptura de los límites epistemológicos de dos enfoques (positivista vs reflexivo), para intentar articularlos en lo que se ha llamado el enfoque espacial de las ciencias sociales y humanas, intentando encontrar un punto en común donde estas dos visiones puedan converger (Bodenhamer, Corrigan, & Harris, 2010).

El conocimiento geoespacial actual se interesa en la generación, gestión y visualización de la información local y una comprensión del *conocimiento local espacial*. Estos enfoques pueden llegar a ser considerados subversivos en diversos grados. En el ámbito urbano se ha desarrollado una serie de aplicaciones orientada a dar respuesta a las condiciones específicas de la ciudad. Los *urbanitas* participan activamente en algunas ciudades del mundo generando discusiones, colectando datos

y presionando para la solución de los problemas que les afectan; y también estas tecnologías se han desarrollado para el uso del tiempo libre, la cultura y el arte. Los ciudadanos se apropian y participan del espacio ciudadano a partir de instrumentos tecnológicos, muchas de las veces desarrollados por especialistas no académicos. Por la naturaleza de los desarrollos tecnológicos, éstos son ampliamente usados por consumidores urbanos; sin embargo, por la facilidad en su uso, se ha expandido su utilización a las zonas rurales.

PLATAFORMA PARA MONITOREO Y COMUNICACIÓN DE EMERGENCIAS A DESASTRES NATURALES. CASO: MORELIA MICHOACÁN

El proyecto que a continuación se presenta se llevó a cabo en Morelia Michoacán, este proyecto fue financiado de diferentes formas por la UNAM, el CONACYT y la Fundación Lincoln para políticas de suelo, en su capítulo para América Latina. El objetivo del proyecto fue analizar la región norte de la ciudad la cual sufre de inundaciones recurrentes, asimismo se diseñó un prototipo de plataforma web de monitoreo y respuestas de emergencias que permite la cooperación en tiempo real entre diferentes agentes e instituciones de respuesta a emergencias. Derivado de este proyecto, el gobierno municipal gestionó fondos federales para el perfeccionamiento de la plataforma, la cual será probada en la segunda mitad de 2015.

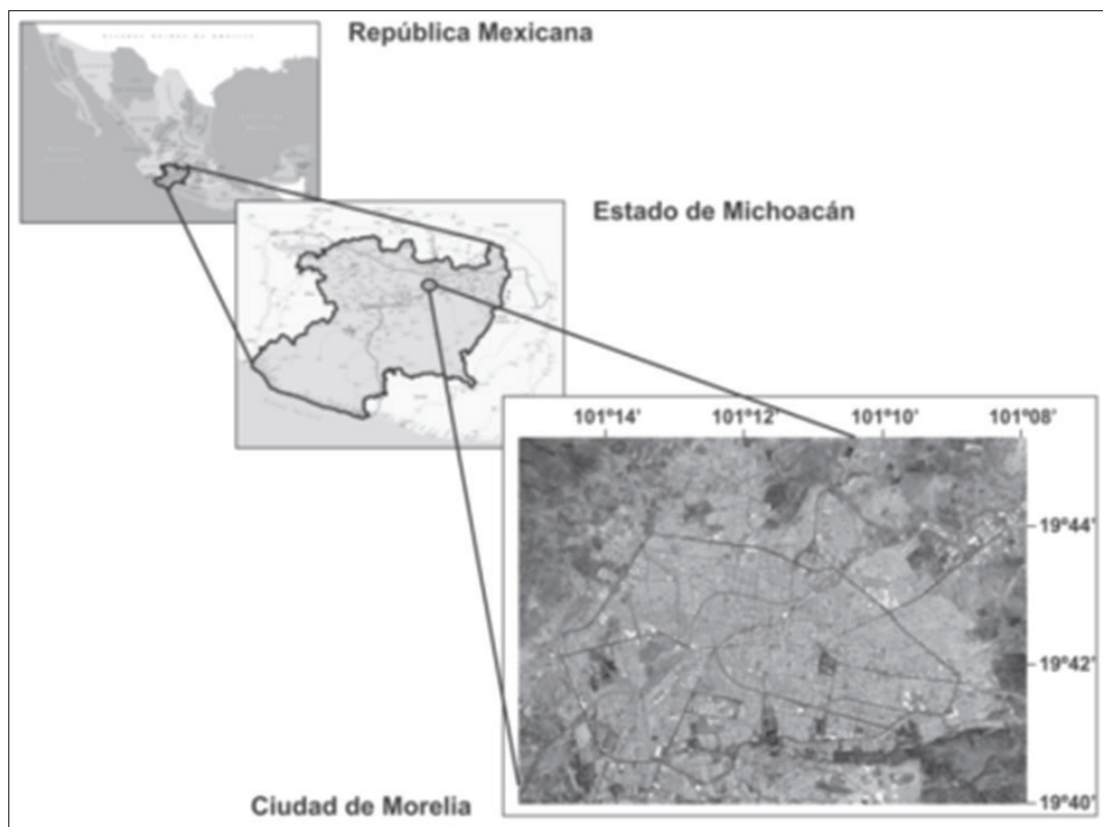
Nuestro objetivo principal fue evaluar la vulnerabilidad de los habitantes de la región, así como las estrategias de respuesta, mitigación y adaptación a inundaciones en 3 comunidades de la zona: Gertrudis Sánchez, La Presa de los Reyes, y Valle de los Reyes. Estas colonias fueron elegidas como tipos representativos de la región, todas ellas ubicadas en la zona periurbana de Morelia. Este estudio, siguiendo la perspectiva cualitativa y participativa, tenía el objetivo de entender desde la perspectiva de los agentes afectados las razones para establecerse y perdurar en esta zona inundable, las prácticas y racionalidades detrás de esta aparente lógica irracional.

La colonia Gertrudis Sánchez se encuentra en una de las laderas del Quinceo y comparte con las otras colonias la cuenca del río El Obispo. En esta colonia las avenidas o inundaciones súbitas son eventos que suceden, aunque no regularmente. Las adaptaciones en casas y calles, que los habitantes en Gertrudis Sánchez han hecho, para mitigar el efecto de estas inundaciones son relevantes de estudiar dado que han transferido el riesgo y los impactos negativos a las colonias ubicadas en la parte baja de la cuenca. Sin embargo, nuestro mayor interés se situó en las dos colonias asentadas en la parte baja de la cuenca: Presa de los Reyes y Valle de los Reyes, porque además de ubicarse físicamente en la zona con mayor riesgo de sufrir inundaciones, existe un desarrollo urbano con prácticas sociales y un diseño de políticas públicas problemáticas, que son características de las zonas periurbanas de las ciudades en países menos desarrollados (Aguilar & Vieyra, 2009).

En la franja norte de la ciudad de Morelia hay una interesante mezcla de habitantes que van des-

de invasores, rentistas individuales, ejidatarios y desarrollos inmobiliarios con inversionistas de diferentes tamaños. En esta zona, el precio de la tierra está en continuo aumento, promovido por la fuerte demanda, así como grandes proyectos recientemente construidos, tales como: el estadio de la ciudad, la nueva terminal de autobuses, la biblioteca estatal, un centro deportivo estatal, centros comerciales y cadenas de supermercados. Además se encuentra a 10 minutos del centro y al borde del anillo periférico de la ciudad. El floreciente equipamiento urbano y el impacto económico propiciado por el desarrollo habitacional genera no solamente trabajo formal local, sino también innumerables oportunidades para trabajadores informales que se ocupan en las calles proveyendo servicios incontables a la ciudad. Este es el mayor factor de atracción para que la gente de bajos y muy bajos ingresos viva ahí; ellos ocupan los lugares que han quedado abandonados, que son riesgosos o 'no utilizables', espacios a los que denominamos intersticiales.

Figura 1. Mapa de la Ciudad de Morelia.



Fuente: Cortesía Juan Hernández Guerrero.

El espectro de vulnerabilidades y percepciones por inundaciones es diferente entre los residentes de las colonias estudiadas. Cada colonia tiene experiencias situadas particulares y por tanto, su conocimiento local cambia, así como las racionalidades que explican las decisiones para mudarse a vivir en una zona peligrosa (Gúiza, Simmons, & Burgess, en prensa; Eakin, Lerner, & Murtinho, 2010; Gaillard, 2010).

Nuestros hallazgos sugieren que, en general, las amenazas por inundación son manejables para los habitantes de esta región de la ciudad, aun las inundaciones extremas. Sin embargo, su principal preocupación es la posesión legal de la tierra y la seguridad. La gente enfrenta muchos otros riesgos que consideran más significativos además de los ambientales y todos estos son el contexto alrededor del cual se entiende el sentido de pertenencia al lugar de residencia.

Con respecto al uso de celulares, plataformas web y aplicaciones encontramos que la mayoría de la gente tiene un celular, de versiones previas al *Teléfono Inteligente*, los adultos lo usan para mantenerse comunicados con posibles empleadores y familiares, así como en caso de emergencias. Los jóvenes tienen celulares inteligentes sensibles al tacto, saben usar las aplicaciones y las redes sociales. En los asentamientos marginales no hay computadoras de escritorio por la falta de servicio eléctrico y redes de telefonía o fibra óptica.

LAS POLÍTICAS PÚBLICAS URBANAS EN MÉXICO

Para entender el contexto en el cual se dan esta serie de asentamientos, revisaremos muy brevemente el contexto del diseño de políticas públicas y el institucional (formal e informal) que contribuyen indirectamente a crear esta forma de expansión urbana de manera intensiva, desordenada y policéntrica (Aguilar & Vieyra, 2009).

En los años noventa, las políticas públicas de vivienda cambiaron para dar paso a desarrolladores privados de vivienda en coparticipación con instituciones estatales. La provisión de vivienda a través de los créditos gubernamentales y formales está dirigida a aquellos que tienen un trabajo o negocio formal (Monkkonen, 2011), con un ingreso de al menos 5 veces el salario mínimo. Sin embargo, datos de Ibarra (2012) sugieren que en el caso mexicano el 60% de la población se encuentra en el sector informal, lo cual deja a un enorme sector de la población sin acceso a los beneficios de un crédito respaldado por el gobierno. El efecto colateral de esta política es la autoconstrucción; paradójicamente el 60% de la vivienda en México es por autoconstrucción y autofinanciamiento (Kothari, 2004), lo cual soluciona parcialmente el problema de vivienda, al dejarla en manos del ciudadano y los *loteadores* que monopolizan el mercado de tierras y se llevan el mayor beneficio económico.

La combinación explosiva de bajos salarios, desempleo y una pobre provisión de vivienda desde la parte gubernamental, empuja a la gente de muy bajos ingresos a vivir cerca de lugares donde puede hacer uso de los beneficios de la ciudad, aunque sean inadecuados para vivir.

LA PLATAFORMA DE MONITOREO Y RESPUESTA A EMERGENCIAS EN UN CONTEXTO DE INUNDACIÓN

Este proyecto se abordó con una herramienta web, que tiene el potencial de vincular la información espacial y situada en tiempo real, con los responsables de dar respuesta a emergencias,

ya sean ONG, académicos o cualquier organización seleccionada como monitor y receptor de los mensajes enviados desde los dispositivos móviles o la web. Además de ubicar geográficamente el reporte, la plataforma genera estadísticas sobre el tipo de sucesos, horas y recurrencia, también organiza la información colectada durante el evento.

La plataforma usó como base Ushahidi y particularmente su propuesta de *crowdmap*. Esta plataforma web fue desarrollada en Kenia, África, para mantenerse informados sobre los brotes de violencia postelectoral y para establecer vínculos entre reporteros, periodistas y ciudadanos en general en los lugares donde éstos ocurrían.

Ushahidi ha evolucionado como plataforma a partir de una serie de mejoras y aplicaciones como el *crowdmap*. El *crowdmap* se origina en la idea del *crowdsourcing*, y se relaciona con colaboraciones abiertas en la web por parte de grandes grupos de personas. El *crowdmap* de Ushahidi permite compartir videos, sonidos y textos del lugar donde están sucediendo los eventos, en este caso, la inundación o el evento extremo. Los usuarios emiten reportes sobre la situación en la que se encuentran y ésta es recibida por las autoridades y los usuarios involucrados, particularmente, en este caso, aquellos orientados a la respuesta a emergencias o el monitoreo de posibles eventos desastrosos.

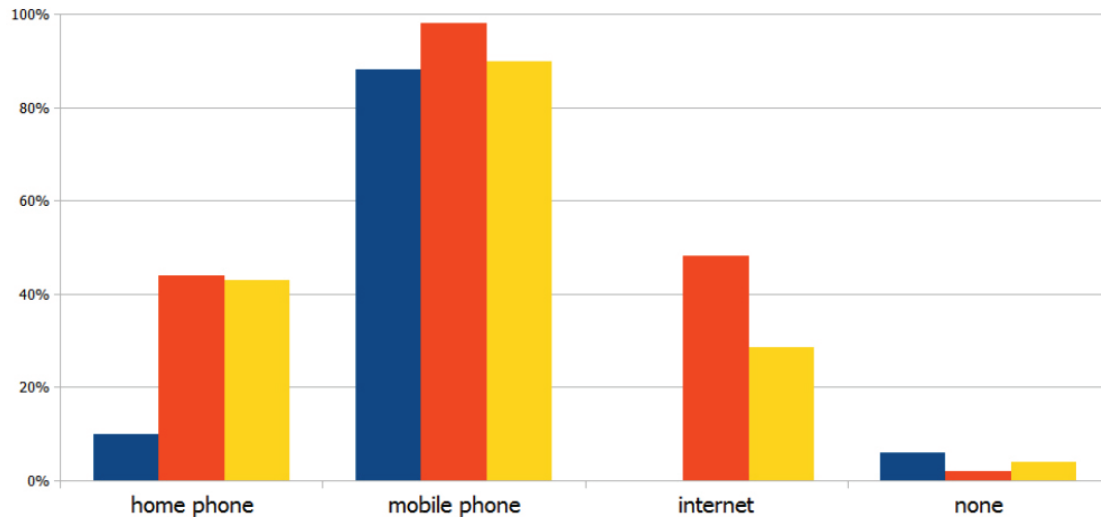
Nuestro estudio en la zona norte de la ciudad de Morelia, recolectó información sobre el tipo de dispositivos móviles, plataformas de comunicación y tecnologías web a los que tienen acceso los usuarios en las colonias elegidas. Nuestros hallazgos confirman la tendencia del rápido crecimiento y relevancia que están adquiriendo particularmente los teléfonos celulares, éstos expanden la conectividad por su capacidad de crear y sostener redes sociales. Los teléfonos celulares son, por mucho, el más importante servicio de comunicación en México y son una herramienta útil para el desarrollo de plataformas web y aplicaciones, como la que habilitamos para este caso. La reciente integración de los servicios de internet a los dispositivos móviles aumenta significativamente el potencial de uso de estas herramientas para caso de emergencia y desastre.

De acuerdo con los datos de la encuesta que realizamos, más del 88% de los hogares tienen al menos un celular. En el caso de Presa de los Reyes, el asentamiento de menores ingresos de la zona, la información recogida muestra que en los hogares hay teléfonos celulares, la mayoría son muy básicos, aunque encontramos que los más jóvenes tienen Teléfonos Inteligentes (*smartphones*), que se adquieren en el mercado negro.

En la gráfica (figura 2) se puede observar que en las colonias seleccionadas la mayoría cuenta con teléfono celular y teléfono fijo, llama la atención que en Gertrudis Sánchez, la colonia con un componente rural más elevado, no reportan el uso de internet. En contraste se observa que los habitantes de Valle de los Reyes pueden contratar todos los servicios, esto se explica por las características sociodemográficas de sus habitantes y un estilo de vida que a tono con las nuevas

tendencias habitacionales, se diferencia del resto de las colonias circundantes (Hernández & Vieyra, 2010).

Figura 2. Acceso a teléfono e internet en Gertudis Sanchez y Valle (El Lago).



Fuente: Cortesía de Rickmers (2014: 73).

El tema de las redes sociales y las aplicaciones diseñadas para celulares y tabletas es interesante. La gente en estas zonas se comunica haciendo uso de estas aplicaciones en sus celulares para acceder a las redes sociales, *textear* y enviar correos electrónicos. Los habitantes más jóvenes hacen uso de una gama más variada de aplicaciones. Los usuarios de teléfono envían y reciben fotografías para lo cual utilizan sus celulares, 43% en Gertrudis Sánchez y 64% en Valle de los Reyes.

UN CASO APARTE: PRESA DE LOS REYES

Las entrevistas en Presa de los Reyes se llevaron a cabo de manera personal, con preguntas abiertas, los temas centrales se orientaron a entender las razones por las cuales habitan en el lugar, ¿cómo llegaron?, ¿en qué condiciones?, ¿cuáles son sus expectativas al vivir ahí?, sus experiencias con las inundaciones y las razones para permanecer en el lugar.

Presa de los Reyes está situada justo detrás del fraccionamiento residencial Valle de los Reyes. A ambos espacios los divide una barda alambrada y los une un arroyo de temporal, que se desborda durante las lluvias. Los dos comparten el lecho de un pequeño bordo de temporal. Valle de los Reyes está situado en la parte baja. Sin embargo, debido al muro y a que el municipio y la compañía desarrolladora estrecharon el canal para que no pase el agua hacia el Valle de los Reyes, el agua alcanza hasta 1.80 metros en Presa de los Reyes. Las obras de mitigación transfirieron el riesgo de inundación al asentamiento irregular, lo cual no cambia el evento natural de ninguna manera.

Con respecto al uso de celulares, desde el primer momento nos percatamos de su uso constante en Presa de los Reyes (el asentamiento irregular), los celulares de más bajo precio y con un mínimo de servicios son usados por los adultos. Los celulares más sofisticados los usan los jóvenes, utilizan aplicaciones como *facebook* o *twitter*, *whatsapp*, *Instagram*, etcétera. Como es la tendencia en todo el país y Morelia no es la excepción, existe un mercado negro de venta de sofisticados teléfonos celulares robados o perdidos.

También nos informaron, que regularmente camionetas de las dos compañías más fuertes en venta de telefonía y servicios celulares (Telcel y Movistar) pasan ofreciendo crédito muy accesible para la adquisición de teléfonos, y en el asentamiento hay una casa en la que pueden comprar recargas de tiempo aire. El uso de los celulares entre los adultos tiene fines laborales y de contacto con familiares, hablan poco y usan mensajes escritos, reportan la compra semanal de entre 20 y 50 pesos. Aunque pueden recibir llamadas y mensajes de texto aun si no tienen crédito. En ninguno de los casos tienen computadoras de escritorio ni portátiles, las condiciones en las cuales reciben el servicio eléctrico y el nulo acceso de la telefonía fija no les permite tener el servicio de internet, un factor central es la nula capacidad económica para pagar una renta fija a las compañías telefónicas.

Una de las principales quejas entre los habitantes del asentamiento Presa de los Reyes, es el rechazo que constantemente sufren de parte de sus vecinos y del gobierno. No hay policía que se atreva a circular en sus calles, no hay alumbrado público por lo que las noches son peligrosas y cuando ha habido inundaciones, incendios o alguna emergencia, los cuerpos encargados de dar respuesta no responden, o responden muy lentamente. Un funcionario de gobierno, entrevistado al respecto, señalaba en relación al asentamiento hoy habitado por más de 5 mil familias: *Son un dolor de cabeza, para nosotros no existen hasta que les pasa algo.*

Los habitantes de Presa de los Reyes se dan cuenta de la invisibilización y del estigma y que pesa sobre ellos; se saben caracterizados como un lugar habitado por ladrones asesinos, drogadictos y prostitutas. Sin embargo, señalan que de esos hay en todas las clases sociales y en todas las colonias, solo que, como el lugar es muy pobre (ver figuras 3 y 4), se piensa que ahí todos tienen esas actividades y todos son criminales.

La gente de Presa de los Reyes está dispuesta a participar, está comprometida en hacer más vivible el lugar que habita, tienen una idea de futuro, tienen ideales y no tienen miedo a trabajar, quieren integrarse de manera formal a la ciudad, sólo que no encuentran la manera de hacerlo, y no encuentran un terreno fértil en el cual encauzar sus energías y capacidades.

Figura 3. Habitantes de Presa de los Reyes.



Figura 4. Habitantes de Presa de los Reyes.



EL DESARROLLO DE LA PLATAFORMA USHAHIDI PARA RIESGOS. RELEVANCIA, EFECTIVIDAD E IMPACTOS.

La web 2.0 y particularmente el Conocimiento Geográfico Voluntario, se reconoce en este proyecto como una herramienta relevante para vincular el conocimiento local del espacio de las comunidades, agrupadas en colonias, con las autoridades y ONG, en torno a los potenciales peligros por inundación, en este caso específico, en la zona periurbana de la ciudad de Morelia. La plataforma Ushahidi desarrollada en este proyecto ha sido probada en diferentes contextos. Al evaluar Ushahidi consideramos la relevancia, efectividad e impacto como indicadores principales. Esta es una evaluación cualitativa de la plataforma.

Relevancia

El interés inicial para trabajar con la plataforma Ushahidi se basó en casos usados en otras partes del mundo para responder a emergencias: desde nuestra perspectiva Ushahidi es preciso en la georeferenciación así como en las alertas situadas, lo cual es muy importante en momentos de crisis. Nuestras pruebas resultaron efectivas en relación con la información subida en tiempo real. Un elemento más que contribuye en la efectividad del análisis de la información es que la plataforma Ushahidi articula y ordena los peligros, riesgos y emergencias, lo cual se convierte en un beneficio, en lo que se refiere a la capacidad local de respuesta y gestión de desastres; aunque también puede ser usado para soportar la toma de decisiones en el área, dado que la información es situada.

Efectividad

Debido a las limitantes presupuestales y de tiempo no tuvimos la oportunidad de probar la plataforma en un momento de crisis en la zona de estudio. Sin embargo, nuestras pruebas han mostrado ser efectivas en lo relacionado a la emisión de información de parte de los usuarios y el equipo encargado de coordinar la respuesta. Con base en nuestra experiencia con la plataforma, ésta fue efectiva en la generación de alertas situadas, la información es eficientemente cartografiada de manera situada y complementada con texto y mensajes e imágenes. Una limitante a considerar son las actualizaciones que los equipos y la web requieren, equipos atrasados y una pobre conexión de internet son factores significantes en campo.

Impacto

Desde nuestra perspectiva, el prototipo desarrollado para respuesta a emergencias tiene impacto y puede influenciar a los diseñadores de políticas como a los académicos. En la ciudad de Morelia, el gobierno municipal decidió desarrollar una plataforma similar, financiada con fondos gubernamentales.

mentales, siguiendo como modelo el prototipo desarrollado por el equipo del CIGA-UNAM.

ALGUNOS USOS DE PLATAFORMAS DISEÑADAS EN DIFERENTES CIUDADES

A continuación se presenta una breve lista y descripción de algunas plataformas creadas en diferentes ciudades con objetivos particulares móviles, en la mayoría de los casos los usuarios no son expertos pero comparten intereses y necesidades en común, buscando incidir en las decisiones que se toman en la ciudad donde habitan. La mayoría de las plataformas están diseñadas para utilizarse desde teléfonos móviles inteligentes (*smartphones*), la web o dispositivos.

- *Fix my street* Arregla mi calle. Inglaterra

Originalmente desarrollada en el Reino Unido en 2007, esta plataforma de acceso abierto a través del cual los usuarios pueden reportar baches, semáforos descompuestos y problemas similares con calles y carreteras para ser enviados vía foto o un mensaje corto. Hay una actividad constante en la plataforma, diferentes mejoras se le han hecho, sin embargo el tema más relevante es el establecer comunicación con las instituciones. El envío de la información no asegura que el problema será resuelto.

<https://www.fixmystreet.com/>

<https://www.mysociety.org/projects/fixmystreet/fixmystreet-anywhere/>

- Repara Ciudad, España

Servicio participativo para la Mejora de la Vía Pública. Esta plataforma es considerada un producto por sus desarrolladores, se basa en el intercambio de comunicación con el ciudadano. Cuando un usuario visualiza un incidente en la vía Pública, toma una fotografía activando la función GPS en su teléfono y la envía a la plataforma. Una vez resuelto el incidente, las autoridades tienen la opción de usar la aplicación, subiendo fotografías para informar a los ciudadanos acerca de la solución o no del incidente.

<http://reparaciudad.com/>

- Mi Bogota Verde, Colombia

El propósito de la plataforma es construir de manera colaborativa el mapa ambiental de Bogotá con los ciudadanos, programadores, diseñadores e interesados. Ushahidi es la plataforma base. En nuestro último acceso a la página observamos que desde 2013 no se ha subido ningún nuevo reporte.

<http://mibogotaverde.co/site/>

- *Park Scan*. Estados Unidos de América

Esta plataforma originalmente estaba basada en la web, como única fuente de recolección de in-

formación, la popularización de las aplicaciones para celulares implica que se haga una transición en la plataforma hacia lo que llaman el servicio 311. El objetivo de esta plataforma es recoger los reportes sobre seguridad y mantenimiento de parques de parte de los usuarios. <http://www.sfparksalliance.org/our-work/policy/research/parkscan>

- *Live Singapore*. Singapur

Plataforma creada para recoger reportes en tiempo real sobre las actividades urbanas relacionadas con el ambiente de la ciudad de Singapur con el objetivo de sincronizar los hechos en la ciudad y la toma de decisiones.

<http://senseable.mit.edu/livesingapore/index.html>

- La MontreVerte, Francia

En nuestro último acceso a la página de descripción (febrero de 2015), la dirección ha sido bloqueada o sustituida <http://www.lamontreverte.org/>

La Montre Verte es una plataforma para el monitoreo de la calidad de aire en diferentes zonas de Paris. El proyecto tiene como objetivo multiplicar el número de sensores ambientales en una zona urbana y anima a la gente que vive allí a participar. Funciona a través de un reloj que contiene un chip GPS, un chip Bluetooth y sensores para el ruido y el ozono. A medida que el usuario va sobre su rutina diaria los sensores muestrean periódicamente los alrededores en busca de signos de contaminación. Las lecturas se envían a través de Bluetooth a un teléfono móvil suministrado por SFR que a su vez envía los datos a una base de datos central, el portal CityPulse.

<http://www.fing.org/?La-Montre-verte-City-pulse-Green&lang=en>

MÉTODOS

En la región estudiada utilizamos una metodología mixta, la cual consideró las diferentes condiciones sociales, económicas y geográficas de los habitantes. En donde fue posible se aplicó una encuesta, en donde las condiciones no lo permitieron optamos por métodos cualitativos, menos invasivos. Asimismo se hizo un análisis espacial para validar la información recibida.

En tres colonias aplicamos una encuesta con la intención de conocer la vulnerabilidad social y los riesgos percibidos, así mismo el cuestionario contenía observaciones de los encuestadores sobre las condiciones materiales de las casas; además de una batería de preguntas orientadas a conocer el tipo de dispositivos móviles que utilizaban, acceso a redes sociales y a internet, frecuencia de uso y presupuesto semanal utilizado para tal fin. Una muestra no probabilística de 50 hogares se consideró suficiente, la encuesta fue aplicada el 18 de mayo de 2013.

En el asentamiento de más bajos ingresos la estrategia de aproximación y colección de datos fue

distinta, por una parte optamos por contactar a las ONG, iglesias y líderes políticos de la zona, para después continuar con una estrategia de bola de nieve. En todos los casos buscamos integrar las diferentes perspectivas de los habitantes con el fin de tener una idea de las diferentes percepciones y entendimientos de la gente con respecto a las inundaciones, las autoridades, su condición en la ciudad y el uso de dispositivos móviles.

Para conocer la topografía del área se usó el LIDAR con una resolución de un metro, lo cual permitió un análisis detallado de la susceptibilidad a sufrir inundaciones del área estudiada, particularmente del asentamiento de más bajos ingresos, que sufre los efectos más negativos.

Debido a la falta de datos hidrológicos y meteorológicos para la zona, no es posible estimar periodos de retorno para eventos lluviosos que pudieran causar escenarios de desastre. Sin embargo, en la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos existe una relación inversa entre la magnitud y la frecuencia (Tobin & Montz, 1997), lo cual implica que eventos de gran magnitud ocurren con poca o menor frecuencia que aquellos de menor magnitud. La figura 5 muestra un posible escenario de las zonas más afectadas, en un escenario menos severo, pero con una alta probabilidad de ocurrencia. El cual resultó en áreas inundadas hasta un metro de altura cubriendo 2.7 hectáreas.

Figura 5. Modelo Lidar con escenarios de inundación en el área de estudio.



Fuente: elaboración propia.

DISCUSIÓN

El enfoque crítico de los SIG pretende dar voz a aquellos que son sistemáticamente silenciados, para lo cual se basa en principios de transparencia, participación, igualdad y cooperación. El giro que en la actualidad han dado los sistemas de información geográfica, se complementa con el desarrollo de tecnologías y dispositivos móviles, empoderando al usuario común y corriente. Este proceso no había sido vislumbrado por los críticos de los SIG en la década de los noventas.

El reto de las tecnologías móviles y el desarrollo informático es permitir la comunicación horizontal democrática, con los que toman y diseñan las políticas públicas. Para ello, se requiere de parte de los usuarios, académicos, investigadores, administradores y políticos flexibilidad e imaginación para usar instrumentos tecnológicos, y cuestionar supuestos positivistas cuantitativos, facilitando la inclusión de modelos reflexivos, para facilitar el cambio social en beneficio de los menos favorecidos de la sociedad (Elwood, 2006).

Por otra parte, en el ámbito académico y teórico, el gran reto que impone hoy la informática y la tecnología es lograr la hibridación de las ciencias humanas, con la perspectiva de los SIG, y así generar observaciones profundas en las narrativas acerca de la cultura y la vida de las sociedades. El desafío en conjunto es plasmar espacialmente las experiencias individuales y colectivas, transformado el texto en mapas y los mapas en textos (Bodenhamer et al., 2010).

Los mapas y las imágenes satelitales enactan una posición ideológica, una manera de medir y de seleccionar, Hall (1993) apuntaba que leer un mapa implica un profundo acto de confianza en quien lo hace, en las tecnologías que facilitan su hechura y en la idea del espacio que representa el 'mundo real'. El beneficio de la integración de las tecnologías espaciales en dispositivos móviles de consumo masivo es que cuestionan el uso exclusivo de estos sistemas por *expertos*, deconstruyendo las prácticas de poder que el conocimiento y la tecnología sofisticada sostienen (Foucault, 2007; Latour, 2005), y a su vez se exige, a los *usuarios expertos* en estos sistemas, entrar en debates disciplinarios y teóricos; aspecto que constantemente evaden, por considerar que son innecesarios al tratarse de técnicas, o bien, de representaciones fieles de la realidad en las que no hay nada que cuestionar (Pickles, 2004).

El giro que dio la integración de la web, la tecnología móvil y los SIG contribuye en la producción de "conocimiento alternativo", no basado en la especialización académica, lo cual transforma las teorizaciones con respecto a los SIG y los mapas, y enfatiza el impacto en las prácticas y en la producción social de conocimiento.

El análisis geoespacial y cartográfico tiene un enorme potencial para generar diálogo y acción en los grupos o comunidades, su aplicación e integración en los dispositivos móviles y en la web, facilita la provisión de datos e información a los usuarios (ciudadanos) para integrarse de mane-

ra más decidida en las deliberaciones sobre políticas públicas a escala local (Harvey, 2003, 2013; Sheppard, 2005).

En el estudio de caso encontramos un microcosmos de prácticas con respecto a las inundaciones, la zona norte de la ciudad se constituye por una amplia gama de habitantes de diferentes niveles socioeconómicos atraídos por los beneficios que provee la ciudad. La literatura con una perspectiva crítica en temas geográficos urbanos (Soja, 2010; Smith, 2008; Harvey, Kwan, & Pavlovskaya, 2005), de ecología política (Pelling & Wisner, 2009; Wisner, 1993) y SIG (Goodchild, 2007; Sheppard, 2005; Pickles, 1995) se han orientado a entender las condiciones sociales y espaciales de un modelo de crecimiento urbano descentrado y fragmentado que pone en riesgo a los sectores más vulnerables. Particularmente, en el contexto latinoamericano (Vieyra, 2006), este modelo lleva a los sectores de más bajos ingresos a habitar en zonas abandonadas y riesgosas, adaptándose a condiciones muy precarias, aunque siempre en la búsqueda de una integración formal en la ciudad (Soja, 2010; Vieyra, 2006).

CONCLUSIONES

El objetivo de este capítulo es introducir la idea entre los estudiosos de los SIG sobre las posibilidades que estas técnicas brindan para el entendimiento profundo de los problemas sociales y contribuir en el cambio social a favor de los sectores más vulnerables. Asimismo plantea la posibilidad de iniciar un diálogo con las ciencias cuyo enfoque es reflexivo; se trata de impulsar una masa crítica entre académicos, tecnólogos, diseñadores de políticas públicas y usuarios, con el fin de integrar los diferentes conocimientos; aspecto que la tecnología actual permite hacer de manera muy sencilla.

El grado de flexibilidad y amigabilidad de la tecnología informática y el software es tal, que usuarios no expertos están diseñando plataformas orientadas a cubrir necesidades específicas y en muchos de los casos a desinvisibilizar a comunidades, empoderándoles y dotándoles de derechos.

Con respecto a la plataforma de monitoreo y envío de información a organizaciones de respuesta gubernamentales, existe la limitante tecnológica, sin embargo la brecha tecnológica será rápidamente cubierta en los próximos años. En la mayoría de las clases sociales el teléfono celular y los dispositivos móviles son parte de la vida cotidiana y en las clases con más bajos ingresos, el uso del teléfono celular es casi la única manera de mantenerse comunicado con posibles empleadores, familiares y redes.

Los dispositivos móviles mejorados con GPS y el desarrollo de los sistemas web implican cambios en las prácticas sociales y tecnológicas de las cuales tenemos aspectos positivos, tales como la posibilidad de desinvisibilizar a los grupos marginales.

Una de las limitaciones más relevantes que encontramos es la protección de datos. El usuario en-

vía un reporte desde su celular y el GPS lo ubica en el lugar preciso desde donde se envió el texto, informando también de la hora y el día. Cada uno de los reportes conforma una base de datos desde la cual se hace un análisis de la información, por lo cual es importante conocer la ubicación geográfica del usuario. Esta información la conocen los responsables del manejo de la plataforma, sin embargo, este tipo de información compromete la seguridad del usuario en sociedades donde informar sobre posibles omisiones de parte de la autoridad, complicidades o actos ilegales.

Los retos futuros de la investigación en análisis geoespacial con un enfoque crítico están relacionados con la capacidad de establecer el ciclo completo de comunicación entre usuarios y receptores, para que dejen de ser simples emisores de información. Asimismo, el tema de la seguridad y el manejo de los datos personales, es un tema a estudiar, quién es el receptor de esa información y qué hará con ella es relevante. Finalmente, en el aspecto teórico, estamos viendo los efectos en las prácticas sociales y culturales de este tipo de desarrollos tecnológicos. Se espera un desarrollo aun mayor de los dispositivos móviles, los programas basados en la red y la integración de otras disciplinas. La ciencia y la técnica tienen las dos caras de Jano, es un reto para científicos e investigadores de todas las áreas tener la creatividad necesaria que les permita flexibilizarse para poder convergir apoyando el cambio social justo democrático y participativo.

GLOSARIO DE ENFOQUES BÁSICOS

Actualmente la terminología y la conceptualización en el campo de la Información Geográfica través de la cual se tamiza la información, parte de la duplicación, imprecisión y confusión de conceptos clave. Las distinciones fundamentales están en el grado y tipo de participación relacionados con la información que es voluntariamente suministrada, conocida y participativa, o la información oportunista que es desconocida, pasiva, no autorizada y desconocida. Asimismo existen diferencias entre el suministro unidireccional de datos de los ciudadanos, y los flujos interactivos de información, con retroalimentación o diálogo.

Hay dos temas fundamentales en el desarrollo de la Información Geográfica Voluntaria y los Contenidos Generados por el Usuario, los cuales se encuentran estrechamente vinculados: La ciencia ciudadana y la georeferenciación en la forma de Sistemas de información Geográfica.

a) La 'Ciencia Ciudadana'. La Participación de la Gente basada en Conocimiento generado de fuera de la Academia y del "conocimiento calificado".

La Ciencia Ciudadana surge como parte del impulso post-modernista que plantea la participación de la gente en todos los ámbitos de la vida social: desde la planeación, el diseño, y la aplicación de las decisiones cívicas. La consecuencia directa de este impulso es la re-valoración de la realidad percibida socialmente basada en el conocimiento fenomenológico y el conocimiento técnico desarrollado por personas sin conocimientos académicos. El empoderamiento del "conocimiento

popular” resultó un elemento importante que desafía el sistema de conocimiento reconocido y legitimado por la academia; por lo tanto, a menudo genera conflicto con el conocimiento académico autorizado. Los conceptos amplios dentro del enfoque de ciencia ciudadana son: *contenidos generados por el usuario e información ciudadana voluntaria*, además de los contenidos periodísticos ciudadanos; ninguno de los cuales necesariamente tiene que ver con el conocimiento “científico”, aunque su contenido puede ser “científico”.

La Ciencia Ciudadana, y los observatorios ciudadanos así como algunas formas de *crowdsourcing* (abastecimiento masivo) se basan en la participación de los ciudadanos generando procesos en un conflicto político y epistemológico a la ciencia establecida con el conocimiento popular.

b) Los Sistemas de Información Geográfica y la Web

La segunda base fundamental está relacionada con los vertiginosos avances tecnológicos en el manejo y la utilización de la información geoespacial en la ciencia y la tecnología. El término ‘WebGIS’ resume diferentes implicaciones sociales y culturales que conllevan las extensiones de tecnologías y sistemas de información geográfica, tales como: mash-ups, SIG web, cibercartografía, geotagging, y los medios situados. Todos ellos con amplias implicaciones en los marcos de conocimiento para la Ciencia Ciudadana.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es resultado del proyecto de investigación financiado por Lincoln Foundation for Land Policy, denominado: Local Capacity to Combat Flood Risks in Two Peri-Urban Communities – Local Knowledge and Potential in Interstitial Spaces. Los autores agradecemos particularmente a: Yadira Mendez, Antonio Navarrete y Antonio Vieyra; así como a los demás miembros del equipo que contribuyeron en la consecución de este trabajo. Asimismo agradecemos el respaldo otorgado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y del Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental de la UNAM.

REFERENCIAS

- Aguilar, A. G., & Vieyra, A. (2009). El Sistema Urbano Nacional y su articulación con los espacios rurales. Implicaciones para el ordenamiento territorial. En J. Delgadillo (coord.). *Política territorial en México. Hacia un modelo de desarrollo basado en el territorio*. México: UNAM-Plaza Valdés.
- Bodenhamer, D. J., Corrigan, J., & Harris, T. M. (Eds.). (2010). *The spatial humanities: GIS and the future of humanities scholarship*. Bloomington: Indiana University Press.
- Carr, N. (2010). *The shallows: How the internet is changing the way we think, read and remember*. UK: Atlantic Books Ltd.
- Connors, J. P., Lei, S., & Kelly, M. (2012). Citizen science in the age of neogeography: Utilizing volunteered geographic information for environmental monitoring. *Annals of the Association of American*

- Geographers*, 102 (6), 1267-1289.
- Eakin, H., Lerner, A. M., & Murtinho, F. (2010). Adaptive capacity in evolving peri-urban spaces: Responses to flood risk in the Upper Lerma River Valley, Mexico. *Global Environmental Change*, 20, 14-22.
- Elwood, S. (2006). Critical issues in participatory GIS: Deconstructions, reconstructions, and new research directions. *Transactions in GIS*, 10 (5), 693-708.
- Elwood, S. (2008). Grassroots groups as stakeholders in spatial data infrastructures: challenges and opportunities for local data development and sharing. *International Journal of Geographical Information Science*, 22 (1), 71-90.
- Elwood, S., Goodchild, M. F., & Sui, D. (2013). Prospects for VGI research and the emerging fourth paradigm. En D. Sui, S. Elwood, & M. Goodchild (eds.) *Crowdsourcing Geographic Knowledge: Volunteered Geographic Information (VGI) in Theory and Practice* (pp. 361-375). Netherlands: Springer
- Foucault, M. (2007). Questions on geography. En J. W. Crampton & S. Elden (Eds.), *Space, Knowledge and Power. Foucault and Geography* (pp. 173-182). ABurlington: Aldershot.
- Foucault, M. (1968). *Las palabras y las cosas: una arqueología de las ciencias humanas*. México: Siglo XXI.
- Gaillard, J. C. (2010). Vulnerability, capacity and resilience: Perspectives for climate and development policy. *Journal of International Development*, 22, 218-232.
- García, N. (1995). *Consumidores y ciudadanos. Conflictos multiculturales de la globalización*. México, D.F.: Grijalbo.
- Goodchild, M. F. (2007). Citizens as sensors: the world of volunteered geography. *GeoJournal*, 69 (4), 211-221.
- Güiza F., Simmons P., McCall K.M, & Burgess J. (en prensa). Chronic institutional failure exacerbates vulnerability to flash floods in Cuenca Alta del Río Lerma. *Disasters*.
- Harvey, D. (2003). The right to the city. *International journal of urban and regional research*, 27 (4), 939-941.
- Harvey, F. (2013). To volunteer or to contribute locational information? Towards truth in labeling for crowdsourced geographic information. En D. Sui, S. Elwood, & M. Goodchild (eds.) *Crowdsourcing Geographic Knowledge: Volunteered Geographic Information (VGI) in Theory and Practice* (pp. 31-42). Netherlands: Springer.
- Harvey, F., Kwan, M. P., & Pavlovskaya, M. (2005). Introduction: critical GIS. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 40 (4), 1-4.
- Hernández, J., & Vieyra, A. (2010). Riesgo por inundaciones en asentamientos precarios del periurbano. Morelia, una ciudad media mexicana: ¿ El desastre nace o se hace? *Revista de Geografía Norte Grande*, 47, 45-62.
- Holbraad, M. (2011). *Can The Thing Speak?* OAP Press, Working Paper Series. Recuperado de <http://openanthcoop.net/press/2011/01/12/can-the-thing-speak/>
- Ibarra, D. (2012). *Mercado de trabajo y protección social con referencia especial a Mexico*. México: UN, CEPAL.
- Kothari, M. (2004). Informe del Relator especial Naciones Unidas sobre una vivienda adecuada, como parte del derecho a un nivel de vida adecuado. Naciones Unidas.
- Latour, B., & Weibel, P. (2005). *Making things public: atmospheres of democracy*. Cambridge, MA: MIT press.
- Latour, B. (2005). *Reassembling the social. An introduction to Actor-Network-Theory*. NY: Oxford University Press.
- Manovich, L. (2001). *The language of new media*. Cambridge: MIT press.

- Monkkonen, P. (2011). The housing transition in Mexico: Expanding access to housing finance. *Urban Affairs Review*, 47 (5) 672-695.
- Pelling, M., & Wisner, B. (2009). *Disaster Risk reduction: Cases from urban Africa*. London: Earthscan.
- Pickles, J. (1991). Geography, GIS, and the Surveillant Society. *Papers and Proceedings of Applied Geography Conferences*, 14: 80-91.
- Pickles, J. (1995). Representations in an electronic age: Geography, GIS, and democracy. En J. Pickles, *Ground truth: The social implications of geographic information systems* (pp. 1-30). New York: The Guilford Publications.
- Pickles, J. (2004). *A history of spaces: Cartographic reason, mapping, and the geo-coded world*. New York: Routledge.
- Rickmers, A. (2014). *Conditions and applicability of VGI-Tools in poor urban areas: Coping with risks in the midsized city of Morelia, Mexico* (Tesis de maestría) University of Kiel, Alemania.
- Sillar, B. (2009). The Social Agency Of Things? Animism And Materiality In The Andes. *Cambridge Archaeological Journal*, 19 (3), 367-377.
- Sheppard, E. (2005). Knowledge production through critical GIS: genealogy and prospects. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 4 (4), 5-21.
- Smith, N. (1992). History and Philosophy of Geography: Real Wars, Theory Wars. *Progress in Human Geography*, 16, 257-71.
- Smith, N. (2008). *Uneven development: Nature, capital, and the production of space*. Georgia: University of Georgia Press.
- Soja, E. W. (2010). *Seeking spatial justice*. Minneapolis: University of Minnesota Press.
- Tobin, G. A., & Montz B. E. (1997). *Natural Hazards: explanation and integration*. The New York: Guilford Press.
- Vieyra, A. (2006). Reestructuración sectorial centro- periferia. Los alcances regionales de la Ciudad de México. En A.G. Aguilar (Coord.), *Las Grandes Aglomeraciones y su Periferia Regional. Experiencias en Latinoamérica y España* (pp. 81-111). México: H. Cámara de Diputados, LIX Legislatura, Instituto de Geografía-UNAM, CONACYT, Miguel Ángel Porrúa, México.
- Wisner, B., & Luce, H. R. (1993). Disaster vulnerability: Scale, power and daily life. *GeoJournal*, 30, 127-140.
- Wood, D. (2003). Cartography is dead (thank God!). *Cartographic Perspectives*, 45-47.
- Zook, M., Graham, M., Shelton, T., & Gorman, S. (2010). Volunteered geographic information and crowdsourcing disaster relief: a case study of the Haitian earthquake. *World Medical & Health Policy*, 2 (2), 7-33.

PROCESOS DE SUBSIDENCIAS EN LA CIUDAD DE TOLUCA Y ALREDEDORES
ASOCIADOS A LA SOBREEXPLOTACIÓN DE LOS MANTOS ACUÍFEROS. UNA
APROXIMACIÓN A PARTIR DE CORRELACIÓN DE TÉCNICAS RADAR Y DATOS
GEOLÓGICOS SUPERFICIALES

Denisse Avalos Ortiz*, Norma Dávila Hernández**, José Luís Expósito Castillo***,
Noel Pineda Jaimes** y Xanat Antonio Némiga**

INTRODUCCIÓN

El uso desmedido de los mantos acuíferos se ha convertido en el mayor problema en la generalidad de los países con un acelerado crecimiento de población, ya que, debido al uso inmoderado de sus recursos enfrentan problemas con los sistemas de manejo del agua urbana como el descenso del nivel freático, la contaminación de aguas subterráneas, así como la subsidencia del terreno en ambientes urbanos (Pacheco, 2007).

Particularmente en México, el abastecimiento de agua para uso urbano, agrícola e industrial se produce en buena medida a partir de agua subterránea. De acuerdo con Conagua (2010), México cuenta con aproximadamente 650 acuíferos en su territorio, donde 101 de los 282 acuíferos más

* Maestría en Análisis Espacial y Geoinformática, Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México, deroxi3@hotmail.com

** Laboratorio de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica, Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México, nadavilah@uaemex.mx, nbpinedaj@uaemex.mx y xanynemiga@rocketmail.com

*** Centro Interamericano de Recursos del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México, jlexpositoc@uaemex.mx

importantes, que proveen el 66% del agua utilizada en todo el país, se encuentran actualmente en estado de explotación intensiva. En consecuencia, una extracción mayor que la recarga del acuífero, origina abatimientos del nivel freático del agua subterránea, mermando así los volúmenes disponibles. Uno de los efectos colaterales de la explotación intensiva de los acuíferos, es la subsidencia del terreno que puede tener expresión en la superficie como movimientos diferenciales paulatinos o por colapso del mismo (Rodríguez- Castillo & Rodríguez-Velásquez, 2006).

Por otra parte, en los últimos cinco años se ha destacado el uso de geotecnologías en el análisis espacial de procesos de subsidencia en México. En particular, el uso de imágenes de radar a partir de técnicas InSAR ha demostrado ser una herramienta eficaz en la estimación de movimientos diferenciales del terreno. Así, se pueden mencionar los trabajos realizados por Calderhead, Martel, Alasset y Garfias (2010) y Calderhead, Therrien, Rivera, Martel y Garfias (2011), quienes presentan el uso de una técnica convencional DinSAR para cuantificar subsidencias en acuíferos con explotación intensiva (como en el Valle de Toluca) y estratigrafía compleja, llevando a cabo técnicas de estandarización entre principio de compactación ID de Terzaghi y datos DinSAR, así como la generación de modelos geológicos 3D, extensiómetros y el monitoreo de pozos. Por su parte, Chaussard, Wdowinski, Cabral y Amelung (2013), realizaron un análisis multitemporal de subsidencia del terreno en distintas ciudades del centro de México, asociadas al abatimiento del acuífero, utilizando imágenes de radar ALOS para el periodo 2007–2011 mediante el método PS. Los autores encontraron una relación intrínseca entre el hundimiento superficial del terreno y las distintas coberturas de uso de suelo, y confirmaron que la extracción de agua subterránea para las actividades agrícolas y urbanas es la principal causa del constante hundimiento del suelo.

Por consiguiente, el presente capítulo tiene por objeto el análisis de procesos de subsidencia en la Ciudad de Toluca asociados a la sobre explotación del Acuífero del Valle de Toluca (AVT) mediante el uso de técnicas de radar y su correlación espacial con datos geológicos superficiales y piezométricos para el periodo 2003-2010.

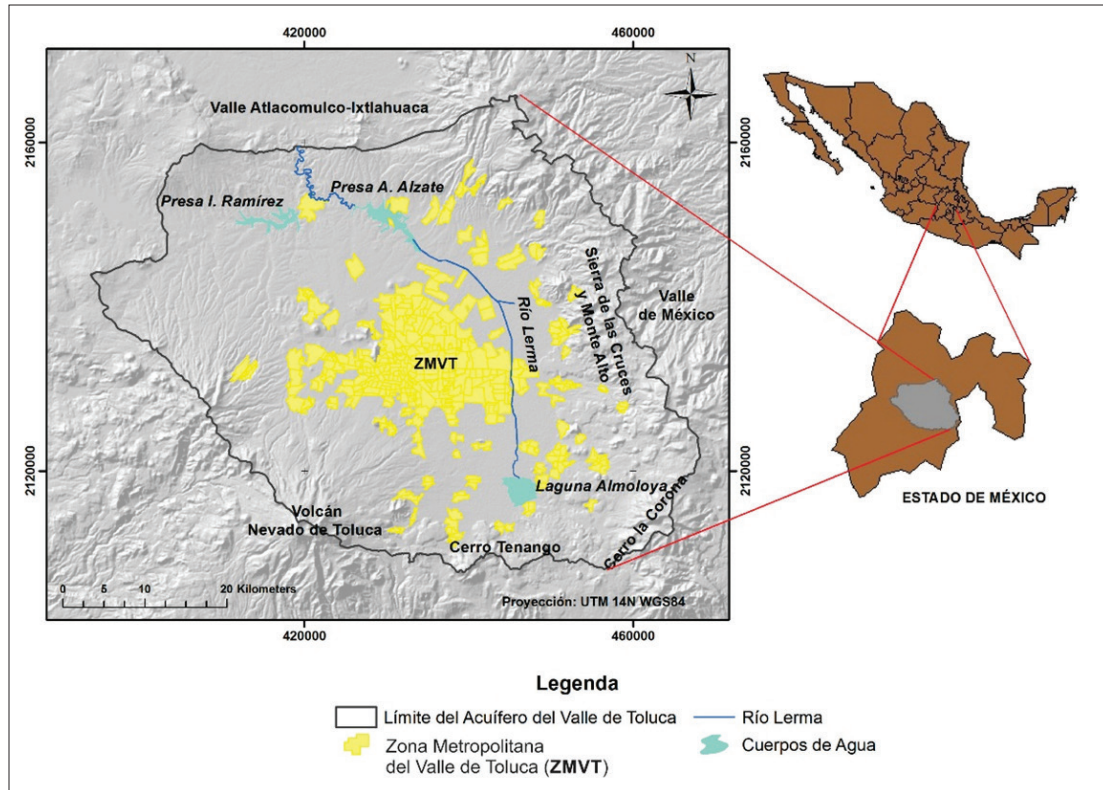
ANTECEDENTES DE LA ZONA DE ESTUDIO

LOCALIZACIÓN

La Ciudad de Toluca se encuentra asentada sobre el AVT en la Cuenca Alta del Río Lerma, que limita al norte con el acuífero Ixtlahuaca-Atlacomulco, al sur con el Cerro de Tenango, al este con la Sierra de las Cruces y Monte Alto, y al oeste con los volcanes del Nevado de Toluca y San Antonio (figura 1). El AVT tiene un área aproximada de 2782.8 km², con una altitud promedio de 2600 msnm y una población de 2,172,651 habitantes; esto de acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2010 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en cuya estimación

consideran el Área Metropolitana del Valle de Toluca. Cabe aclarar que esta área se encuentra localizada en la parte central de México, adyacente a la capital del país, lo que ha permitido que se desarrolle una actividad industrial prominente en la zona de estudio.

Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio.

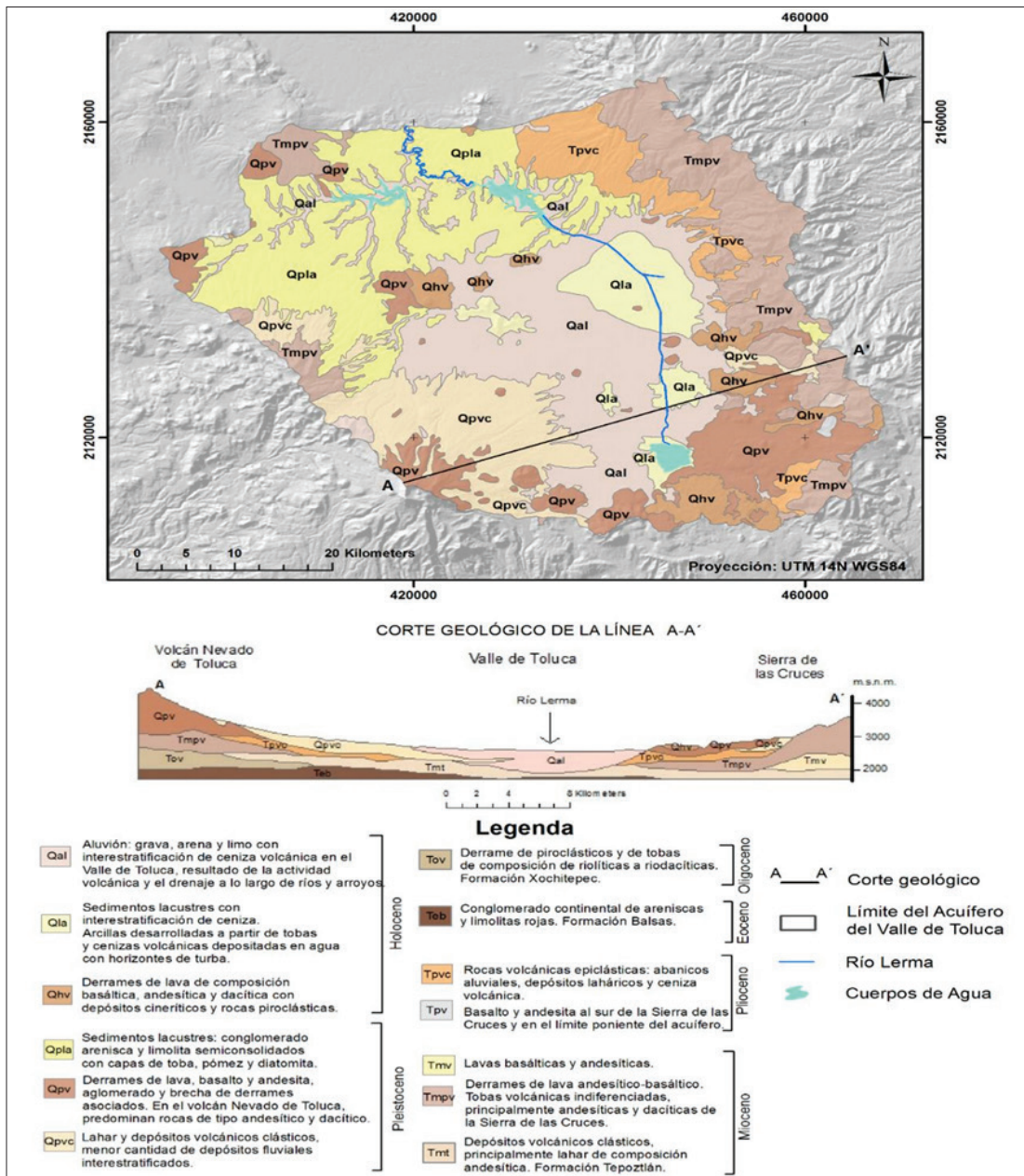


Fuente: elaboración propia.

GEOLOGÍA SUPERFICIAL

El mapa geológico de la figura 2, elaborado por el Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México (IFOMEGEN) y modificada por Expósito (2012), presenta la geología superficial del AVT, la cual está representada por rocas aflorantes que van del terciario medio (26 millones de años) al reciente, asociando a tres grupos principalmente: el primer grupo son rocas de origen volcánico localizadas en las partes altas constituidas por basaltos y andesitas principalmente (unidades geológicas Qhv, Qpv, Tmpv, Tmv, Tpv); el segundo grupo son materiales piroclásticos que se encuentran bordeando las sierras, incluyendo tobas, aglomerados, brechas, cenizas volcánicas y depósitos de pie de monte (unidades geológicas Qpvc y Tpvc); y el tercer grupo está integrado por materiales producto de la desintegración y erosión de los dos grupos anteriores, y constituido principalmente por arenas, gravas, arcillas, limos y depósitos lacustres (unidades geológicas Qal, Qla, y Qpla).

Figura 2. Mapa y corte geológico del AVT.



Fuente: Expósito (2012, con datos de IFOMEGEN de 1994).

En términos generales, los basaltos de composición andesítica se encuentran en forma de extensos mantos de lava, asociados a fisuras o por numerosos volcanes que se localizan principalmente en la parte sur y sureste del acuífero asociado a la Sierra de las Cruces. La importancia de la ubicación de estos basaltos radica en su alta porosidad y permeabilidad e intercalaciones con capas de material escoriáceo que, por su extensión, juegan un importante papel en la zona de recarga del acuífero.

Las rocas piroclásticas cubren extensas porciones del Valle de Toluca, especialmente en las partes

de poca pendiente o planas, y están constituidas principalmente por tobas lacustres con intercalaciones de limo, arcilla, ceniza y horizontes de pómez. Estas rocas se caracterizan por presentar un elevado potencial de recarga y almacenamiento de agua por la intercalación de materiales de diferente granulometría, por lo que un número considerable de pozos de extracción se encuentran situados en dicha zona.

Los depósitos lacustres del Holoceno están constituidos por sedimentos arcillosos y limosos dispuestos en capas laminares de horizontes poco potentes. Estas unidades se localizan en las zonas donde existieron lagunas (Almoloya, Mexicalcingo, Lerma y San Bartolo). Se considera que estos depósitos, dadas sus características litológicas y extensión, son de poca importancia en la recarga al acuífero. Sin embargo, dichas zonas pueden mostrar evidencias físicas de procesos de subsidencia del terreno debido a las propiedades de compresión y expansión de las arcillas. Por otra parte, los depósitos de aluvión se originaron por la erosión del Valle de Toluca y cubren los depósitos volcanoclásticos, los cuales están constituidos por emplazamiento de tamaño variable, que van de arcillas, arenas, gravas hasta cantos sin consolidar, presentando una alta capacidad de infiltración y considerados como buenos acuíferos, según Conagua (2008b).

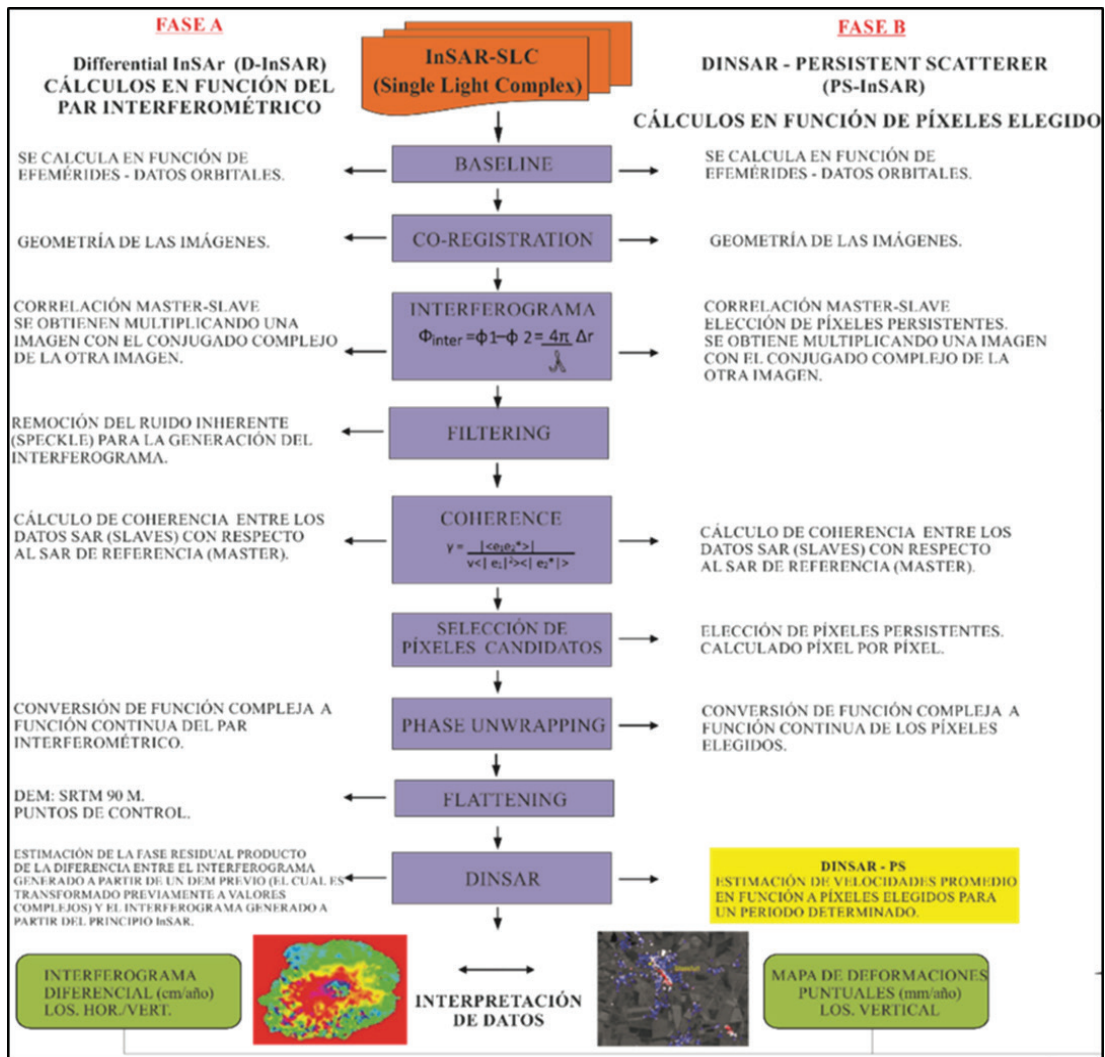
Por otra parte, en términos hidrogeológicos se puede decir que, de acuerdo a la secuencia geológica descrita, el sistema está formado por varios niveles de acuíferos superpuestos que constituyen un acuífero multicapa (Ariel Consultores, S.A., 1996). Sin embargo, de manera general, se distinguen dos tipos de unidades acuíferas: una relacionada con el medio poroso representado por los depósitos de clásticos no consolidados que rellenan la cuenca del Valle de Toluca, cuyo espesor varía desde unos cuantos metros hasta 300 m en el centro del valle; y otra unidad relacionada con rocas volcánicas afectadas por procesos tectónicos que manifiestan permeabilidad secundaria por fracturamiento, con espesores de 150 a 300 m (Conagua, 2008b). Cabe destacar que la mayoría de los sensores piezométricos se encuentran ubicados a dichas profundidades, así como la descripción de las columnas estratigráficas que los acompañan.

METODOLOGÍA

Para aplicar la técnica InSAR-Persistent Scatterer (PS) se utilizaron 31 imágenes complejas SLC (*Single Look Complex*) del sensor Envisat - ASAR para el periodo 2003-2010, en órbita descendente, sobre la trayectoria 2162.

La descripción detallada de la técnica InSAR-PS se muestra en el diagrama de flujo de la figura 3, donde se detalla por fases el procesamiento para la estimación diferencial de la fase. Así, la Fase A explica de manera detallada las etapas del principio InSAR y la Fase B describe la técnica PS para estimar a mayor detalle la fase diferencial asociada a movimientos diferenciales o subsidencias del terreno.

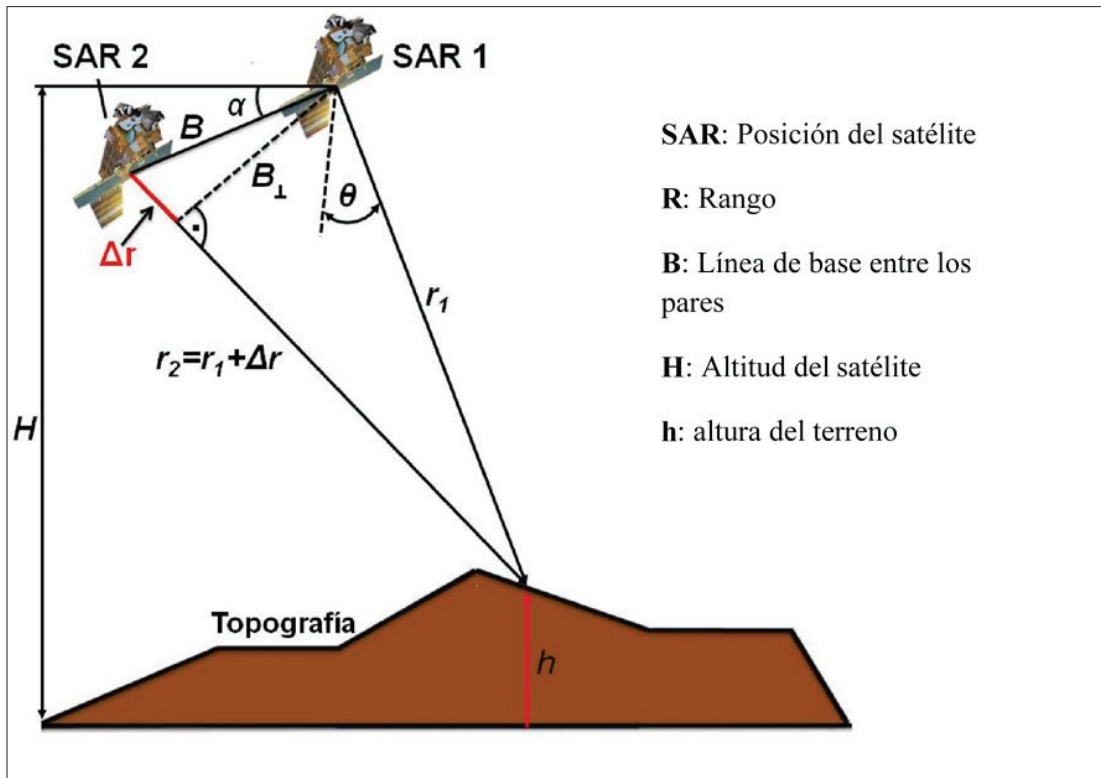
Figura 3. Fases metodológicas del principio InSAR para el uso de la técnica PS.



Fuente: elaboración propia.

InSAR es un principio que permite la estimación de distancias angulares asociadas a un cambio de fase en la señal de retrodispersión hacia el radar, que pueden ser resueltas mediante la geometría de las múltiples observaciones del radar para una misma área iluminada en tiempos distintos (Hanssen, 2001). Así, para llevar a cabo el principio InSAR se requiere por lo menos de un par interferométrico, donde la primera imagen es nombrada *master* y la segunda *slave*. En la figura 4 se muestra la geometría que sigue la técnica InSAR, donde SAR 1 y SAR 2 se encuentran separados por una cierta distancia. La línea que determina la dirección de separación entre las dos antenas recibe el nombre de línea de base normal y permite estimar las diferencias angulares entre las dos adquisiciones.

Figura 4. Geometría de adquisición INSAR.



Fuente: elaboración propia.

A partir del principio InSAR, el objetivo de la técnica Interferometría Diferencial (DinSAR por sus siglas en inglés) consiste en medir cambios mínimos o deformaciones expresados en la superficie terrestre a partir de un par interferométrico complejo adquirido en distintos pases o tiempos, lo cual puede ser expresado de la forma:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi\Delta R}{\lambda}$$

En donde: $\Delta\phi$ se conoce como la fase interferométrica, ΔR es el cambio en el rango debido a un desplazamiento del terreno ocurrido entre la primera y la segunda observación, y λ es la longitud de onda. La ecuación nos indica la diferencia de fase de dos imágenes radar (par interferométrico) adquiridas desde dos posiciones diferentes.

La fase asociada al desplazamiento es extraída directamente del interferograma generado previamente. Una vez que se logra aislar esta fase asociada se puede estimar la componente de movimiento o deformación de cada una de las adquisiciones (SAR 1 y SAR 2) (Crosetto, 2005). De manera gráfica la generación de un interferograma a partir de SAR 1 y SAR 2 es la suma de contribución de los distintos elementos que conforman la fase:

$$\Delta\phi_{int} = \Delta\phi_{topo} + \Delta\phi_{diff} + \Delta\phi_{atm} + \Delta\phi_{noise}$$

En donde: Δ_{int} representa el interferograma, Δ_{topo} componente asociada a la topografía irregular del terreno y está en función de la línea de base, Δ_{diff} es la parte diferencial o componente debido a la deformación, Δ_{atm} es la contribución de la atmósfera debido a cambios en la troposfera y ionosfera, $\Delta\phi_{noise}$ es la componte debida al ruido por perturbaciones de la señal inherentes a ella.

Por consiguiente, si se requiere estimar el cambio de fase como una variación del tiempo, tan solo es necesario despejar $\Delta\phi_{diff}$, lo cual requiere modelar o eliminar del interferograma primario cualquier elemento asociado a la topografía original del terreno así como el ruido inherente y atmosférico. Así, descomponer la fase implica calcular la magnitud de movimiento. En este caso, la fase DinSAR es proporcional a la distancia que ha recorrido el punto bajo observación en la dirección del rango, es decir, a la proyección del tramo que une la posición del punto antes y después de su movimiento en la línea de incidencia satélite-objetivo (Hanssen et al., 2001). De esta forma, cuando el valor de cambio en DinSAR es positivo indica un acercamiento entre el sensor radar y el objeto, mientras que un cambio expresado en valor negativo implica un alejamiento entre el radar y el objeto observado.

Adicionalmente, es importante resaltar que son considerables los componentes o variables que se deben de tomar en cuenta para que el proceso DinSAR sea llevado a cabo con éxito, uno de los más importantes es la línea de base normal. Esta línea se define como la distancia que existe entre SAR1 y SAR2, y cuando es mayor a 1000 m el método no puede llevarse a cabo, debido a la pérdida de distancias angulares derivadas de la geometría entre SAR1 y SAR2. De igual forma, el proceso de corrección es uno de los más importantes para la selección de pares interferométricos ideales, ésta se realiza con el objeto de igualar las dimensiones entre píxeles no coincidentes (relación de píxeles uno a uno) y poder reconstruir la fase en términos de la magnitud de la señal.

Hasta este momento la técnica DinSAR es útil para la generación y selección de interferogramas entre pares individuales para estimar la fase diferencial asociada a las subsidencias del terreno. Sin embargo, con la finalidad de obtener una mayor precisión se utilizó la técnica PS desarrollada por Ferretti, Prati, y Rocca (2000; 2001), la cual se basa en cálculos a partir de píxeles persistentes (*Persistent Scatterers*) o píxeles candidatos. Esta técnica reduce el problema de interferencia atmosférica debido a la redundancia de imágenes con las mismas características orbitales (considerando un número mayor a 20) que permiten la modelación del ruido atmosférico. Así, un aumento en el número de imágenes empleadas para el procesamiento de interferogramas en un mismo tiempo, implica una mayor precisión del modelo, el cual se considera como una función lineal.

La selección de píxeles candidatos se basa en determinar o seleccionar píxeles asociados a reflectores estables o persistentes (*persistent scatterers*) a lo largo de la generación de interferogramas para una serie de tiempo, los cuales muestran un nivel significativo de coherencia a lo largo del tiempo o para el periodo considerado en el estudio (Ferreti et al., 2000). Así, estos “reflectores

estables” implican un mínimo cambio u oscilación en los valores de amplitud de la señal para cada píxel dado, implicando así una baja variación en la señal de radar que con frecuencia se vincula a bajas variaciones en la fase estimada para un tiempo determinado. En términos descriptivos, los reflectores ideales se asocian a ambientes urbanos o estructuras hechas por el hombre, por lo que estos píxeles también identificados como SCR (*Signal-to-clutter*), pueden ser modelados a partir de una distribución Gaussiana de su amplitud (Ferreti et al., 2001). Lo cual indica una mayor intensidad en la retrodispersión de la señal siendo los ambientes urbanos ideales para aplicar la técnica PS. Sin embargo, dicha técnica tiene limitaciones considerables en ambientes morfológicos naturales (Shanker & Zebker, 2007).

Para llevar a cabo cualquier principio InSAR es necesario considerar diversos límites o parámetros en términos de magnitud, fase y características orbitales de las imágenes. Así, para la aplicación del método PS se empleó el módulo *Sarscape* de Envi Versión 5.0 considerando los parámetros enlistados en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de entrada para la estimación de la técnica PS.

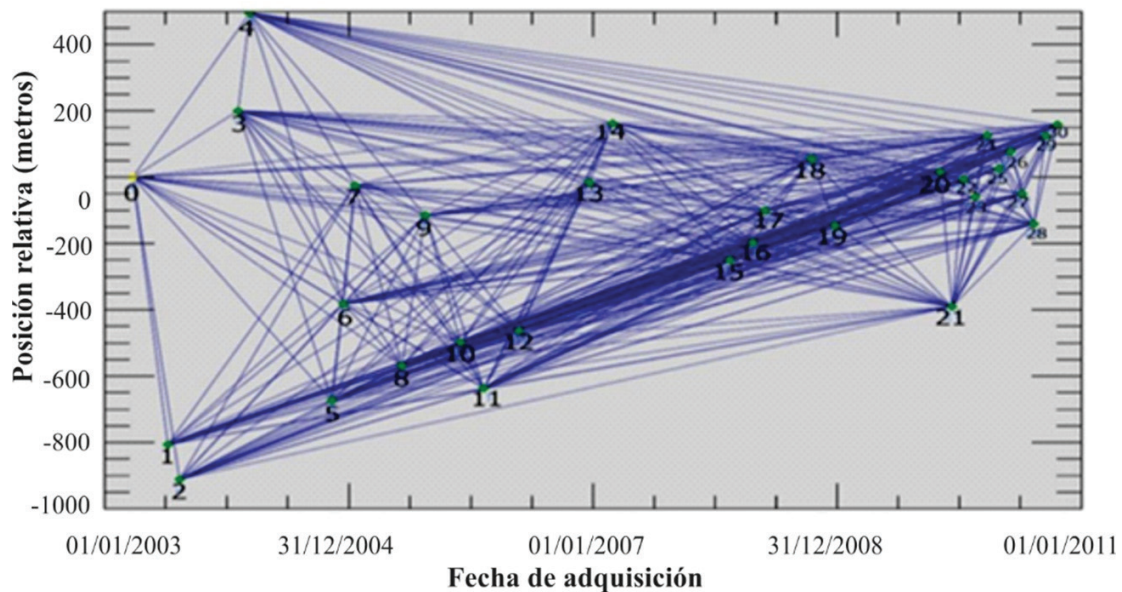
Parámetros De entrada	Valores
Mínima Línea de Base Normal mínima	10 m
Máxima Línea de Base Normal máxima	600 m
Mínima Línea de Base Temporal mínima	30 días
Máxima Línea de Base Temporal alta	3500 días
Límite Coherencia normalizada	0.7
Correlación de pares radar	0.35

Fuente: elaboración propia.

RESULTADOS

Con base en los límites previamente establecidos se calcularon 59 combinaciones de líneas de base normal, lo cual representa un paso crítico para obtener resultados de calidad en las etapas subsiguientes. Esta condición se estableció con la finalidad de preservar la coherencia interferométrica. Así, la imagen *master* se seleccionó con base en la fecha de adquisición más distante (enero de 2003); mientras que el resto de las imágenes se consideraron como *slaves*. En la figura 5 se muestra el cálculo realizado para todas las líneas de base normales posibles con respecto al tiempo, donde el número ubicado en cada uno de los vértices de la nube de datos obedece a la asignación consecutiva de las imágenes complejas empleadas. En la figura 5 se pueden observar que los vértices aislados y alejados de la imagen *master* (asignada con el número “0”) representan a las imágenes que no son candidatas para emplear la técnica PS de acuerdo con los límites previamente establecidos en la tabla 1.

Figura 5. Gráfica de la estimación de líneas de base normal para la selección de los mejores pares interferométricos.

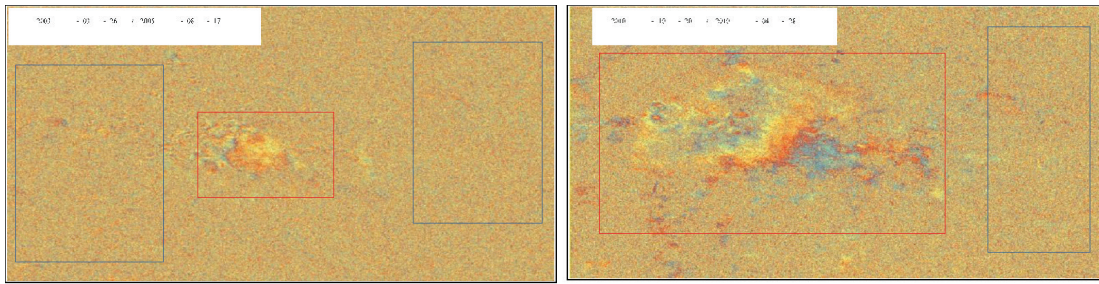


Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se realizó un proceso de *multilooking* aplicando un kernel 5×1 m, el cual implica una estimación del promedio de los píxeles que conforman la imagen de radar. Este proceso además de ser útil para la eliminación de ruido inherente a la señal del radar, es indispensable para el tipo de imágenes empleadas, ya que las imágenes complejas presentan una importante compresión en el acimut, con una resolución original de 5×25 m y con una resolución de pixel de 25×25 m posterior al proceso.

De este modo, con base en el cálculo de las líneas de base normales, corrección y estimación normalizada de la coherencia en términos de la magnitud de la señal, se generaron 46 interferogramas multiplicando una imagen compleja (*master*) por el conjugado complejo de la segunda (*slave*). Así, la fase resultante se entiende como la topografía total del terreno, es decir, representa la suma de la topografía original y cualquier modificación de la misma a lo largo del tiempo. Cabe señalar que la fase interferométrica entre dos imágenes no siempre se resuelve debido al ruido o a la alta decorrelación espacial, temporal y atmosférica que puede haber entre dos imágenes complejas, como se muestra en el ejemplo de la figura 6, donde los polígonos rojos muestran zonas resueltas y los polígonos azules muestran áreas sin resolver. Lo anterior puede ser interpretado de la siguiente manera: la fase que compone un interferograma está constituida por valores complejos 2π , que en términos visuales se identifica por franjas que van en tonalidades del azul al rojo las cuales se vuelven cíclicas al trabajar con valores complejos; siendo áreas ideales para la selección de píxeles candidatos debido a la alta correlación que muestra la información interferométrica a lo largo del tiempo.

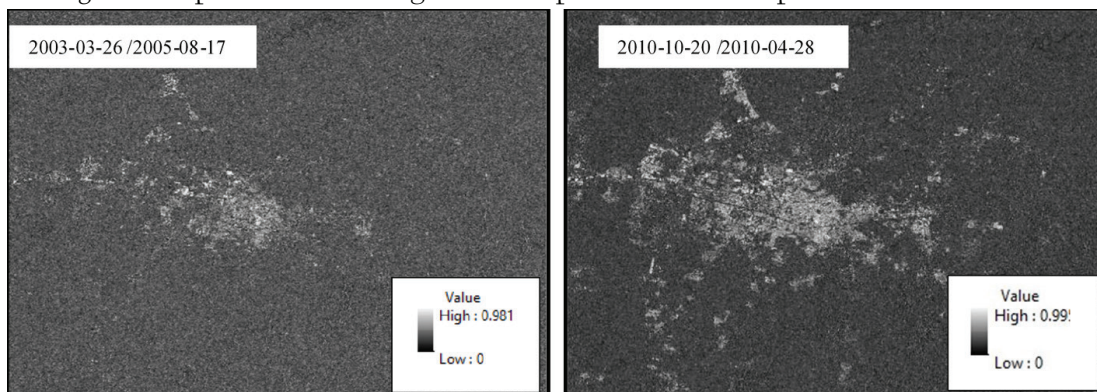
Figura 6. Ejemplo de un Interferograma generado a partir de un par interferométrico.



Fuente: elaboración propia.

De igual forma, al generarse 46 interferogramas se estimaron igual número de mapas de coherencia, que de acuerdo con el diagrama de flujo metodológico es una etapa indispensable para la estimación de la fase diferencial. Así, la coherencia se estimó como la correlación normalizada (0-1) de los píxeles en términos de su fase y amplitud, logrando como principal objetivo evaluar la calidad de los interferogramas generados, donde se pueden presentar valores de 0 (falta de coherencia) a 1 (máxima coherencia). De acuerdo con Lira y Dávila (2011), cuando el mapa de coherencia presenta valores de 0.3 a 0.7 se considera como coherencia aceptable, mientras que valores entre 0.7 a 1.0 se determinan como coherencia excelente. En el ejemplo de la figura 7, los mapas de coherencia interferométrica generados muestran píxeles brillantes asociados a valores cercanos a 1, los cuales se concentran principalmente en el casco histórico de la ciudad de Toluca, es decir, en la zona urbana donde la retrodispersión de la señal de radar es máxima debido al efecto esquina que provocan las construcciones. Mientras que los píxeles en tonalidades oscuras se asocian a valores de baja coherencia vinculados con zonas de vegetación o cultivos, las cuales son áreas donde la fase no fue resuelta debido a la alta decorrelación de la información para el periodo de tiempo de estudio.

Figura 7. Mapas de coherencia generados a partir de distintos pares interferométricos.



Fuente: elaboración propia.

Debido a que la fase interferométrica trabaja con valores complejos que solo pueden ser representados en ciclos de 2π , se hace necesario resolver el problema de la ambigüedad en el desenvol-

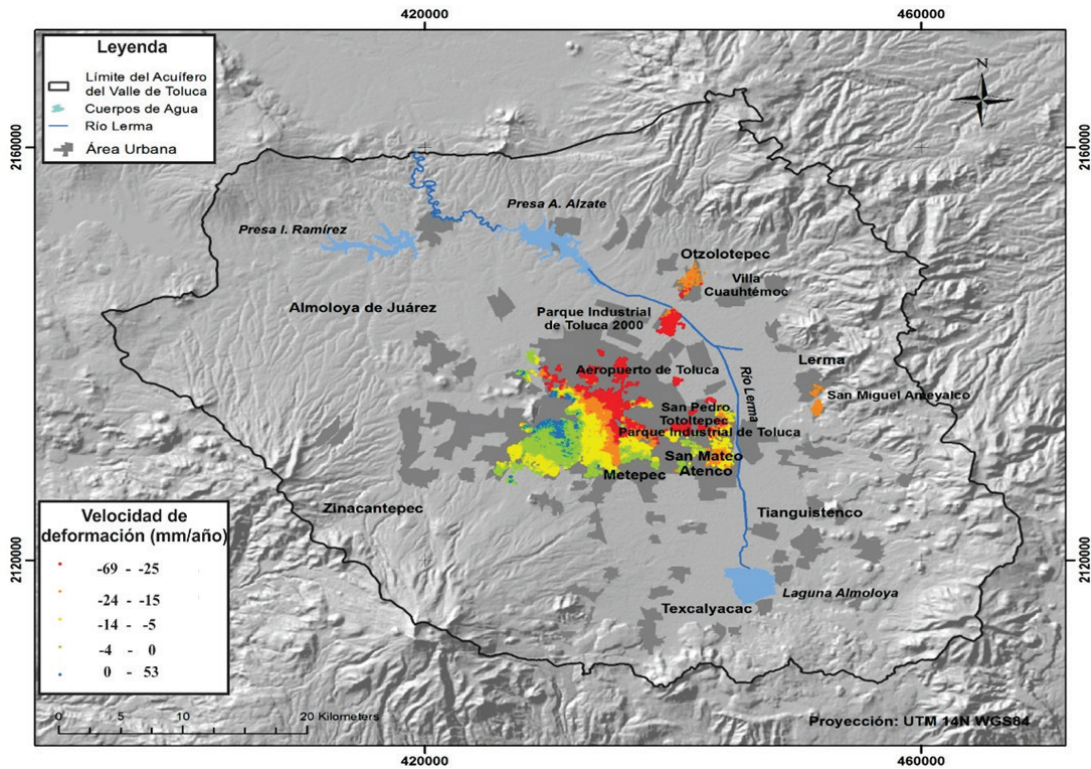
vimiento de la fase (*phase unwrapping*), lo que significa que cada ciclo 2π regresa al origen (0) para volver a iniciar el ciclo. Así *phase unwrapping* implica transformar el interferograma de una función compleja a una función continua. Para el caso de la investigación, se aplicó el algoritmo estadístico del Mínimo Coste de Flujo para los 46 interferogramas, realizando el proceso únicamente en aquellos píxeles donde la coherencia superaba un umbral determinado, que en éste caso fue de 0.7, como se indicó en la tabla 1.

Además, la precisión de la deformación es centimétrica, y está en función del radio de la longitud de onda, ya que el frente de la onda es el que interactúa con el objeto y no toda la longitud de onda. Para el caso de esta investigación, la longitud de onda (λ) es de 5 cm, por lo tanto, cada ciclo 2π representa un desplazamiento (LOS - *Line of Sight*) de 2.5 cm en la vertical. Así, cuando LOS implica un valor positivo significa que el objeto observado se acerca al sensor radar, mientras que un valor negativo implica un alejamiento del objeto respecto al radar. A partir de esta etapa los píxeles candidatos han sido seleccionados de los interferogramas originales para poder estimar la deformación como una función continua y real. Por tanto, al aplicar la técnica PS logramos generar un mapa de deformaciones puntuales selectas a lo largo del tiempo, es decir, únicamente áreas donde la fase fue resuelta para todo el periodo de tiempo de estudio, lo que implica tener un mayor control en el modelo lineal PS logrando obtener precisiones milimétricas.

Así, la precisión se obtiene de la redundancia y manejo de todo un conjunto de datos que presentan alta correlación de distintas fechas para una misma zona, que como ya se mencionó, debe ser mayor a 20 imágenes (Ferreti et al., 2001). Para cumplir con tal precisión se obtuvieron 31 imágenes complejas de la zona de estudio a partir de la propuesta científica sometida a la Agencia Espacial Europea (ESA, 2010), como ya se mencionó anteriormente. Para restar la fase asociada a la topografía original se utilizó un Modelo Digital de Elevación del INEGI con una resolución de pixel de 15 m.

En la figura 8 se muestra el mapa derivado del proceso PS, donde los puntos rojos representan las zonas de máxima velocidad de deformación que fluctúan de -25 a -69 mm, localizadas al este del casco urbano de Toluca; además se logra visualizar cierta tendencia de la localización de los puntos rojos hacia el norte-noreste de la ciudad, hacia la zona del Parque Industrial de Toluca 2000 y la localidad de Villa Cuauhtémoc en el municipio de Otzolotepec. En segundo término se muestran puntos en color naranja que tienen valores que van de -15 a -24 mm, ubicados en la localidad de San Pedro Totoltepec, San Miguel Ameyalco, en la zona Industrial de Lerma y San Mateo Atenco. También podemos observar puntos amarillos cuyos valores fluctúan de -5 a -14 mm, localizados en la zona de Metepec. Los puntos verdes representan zonas de mínima deformación, con valores de 0 a -4 mm; y, por último, tenemos los puntos azules donde no se presentan deformaciones.

Figura 8. Mapa de deformaciones puntuales utilizando la técnica PS. Periodo 2003-2010.



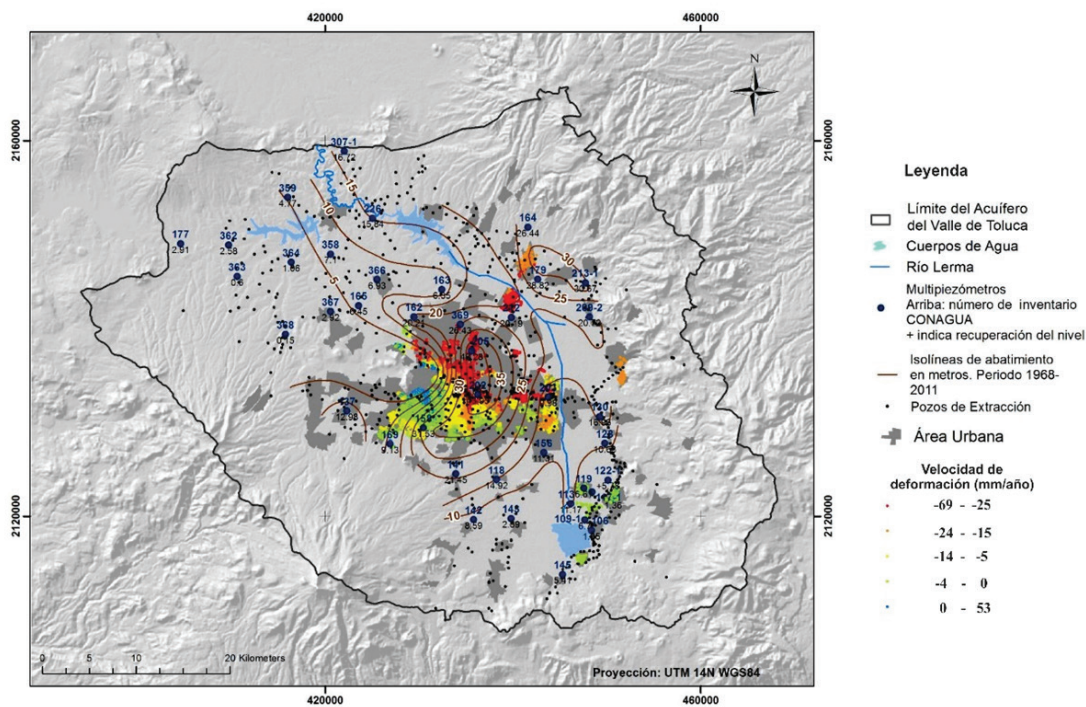
Fuente: elaboración propia.

DISCUSIÓN

Existen diversos trabajos donde se ha evidenciado una relación directa entre el mayor gradiente del nivel piezométrico histórico del acuífero y la presencia de agrietamientos o hundimientos superficiales (Zermeño, Pacheco, Mendoza, Arzate, & Arroyo, 2006; Pacheco, 2007; Diez, 2009; Calderhead et al., 2011). De esta forma, con la intención de evidenciar correlaciones espaciales entre los dos elementos mencionados en el AVT se emplearon datos piezométricos históricos de la Conagua (2008a), publicadas para el periodo 1968-2011, luego se realizaron mapas de curvas de aproximación de abatimiento para sondas con una profundidad de 100 a 200 m. La selección de la profundidad de la sonda se determinó con base en la cota donde se han realizado mayores extracciones de agua potable y representa el nivel más explotado del acuífero (Expósito, 2012). Para la estimación de las curvas de aproximación de abatimiento se utilizó el algoritmo *Kriging*, que es un método geoestadístico basado en la autocorrelación, el cual pondera los valores medidos circundantes para calcular una predicción de una ubicación sin mediciones. De esta forma, se obtuvo una aproximación espacial de las máximas cotas de abatimiento a distintos niveles de profundidad, lo que permitió evidenciar y seleccionar transectos en el terreno útiles para discutir una posible correlación entre los procesos de subsidencia con el nivel de abatimiento del acuífero.

La figura 9, representa el mapa de abatimiento del acuífero para el periodo 1968-2011 sobrepuesto al mapa de velocidad promedio de subsidencias (figura 7) e incluye la distribución de los pozos de extracción. En ella se puede observar un mayor acotamiento o acercamiento entre las curvas, lo cual expresa una máxima cota de abatimiento. De igual forma, el acotamiento de abatimiento máximo guarda una correlación espacial con el límite o inicio de los puntos de velocidad de formación máxima derivados de la técnica PS (que corresponden al rango -25 a 69 mm/año). La simulación de las curvas de máximo abatimiento corresponden con la ubicación de la batería de pozos al este, que se asocian con uso industrial, y al noreste, que corresponden con una concentración de pozos para usos industrial y agrícola, al parecer de crecimiento constante a lo largo del tiempo.

Figura 9. Mapa de tendencia de curvas de abatimiento para rangos de agua subterránea entre 100 y 200 m de profundidad; considerando el periodo 1968 – 2011.

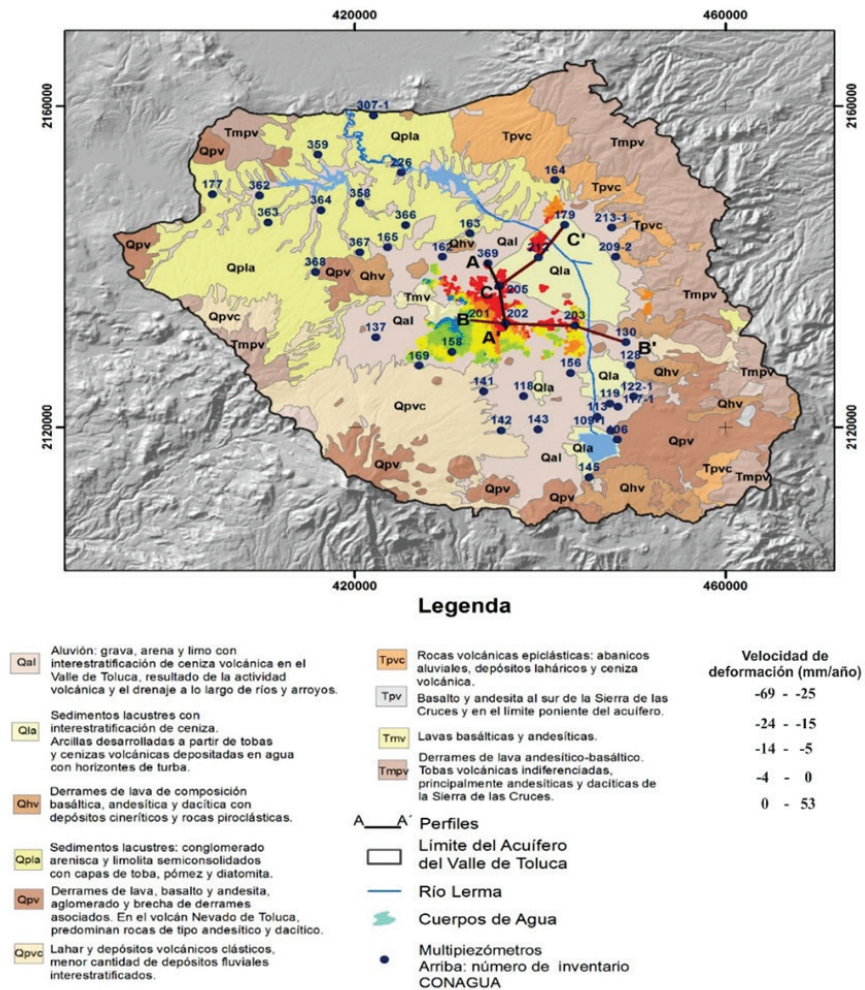


Fuente: elaboración propia.

Para verificar la correlación espacial mencionada en párrafos anteriores, se seleccionaron tres transectos que fueran de utilidad para justificar la expresión de las subsidencias en el terreno. Por lo tanto, a lo largo de estos transectos, se generaron perfiles topográficos asociados a la geografía superficial del Valle. De igual forma, se consideraron los datos del nivel del agua subterránea derivados de los piezómetros involucrados a lo largo del transecto y su relación con los puntos PS que intersectaron al transecto. Lo anterior con la finalidad de identificar secuencias geológicas asociadas a un medio poroso o impermeable de acuerdo a los datos históricos del piezómetro en cuestión que pudiera ser asociado a procesos de subsidencia en superficie de acuerdo a los puntos PS.

De esta forma se definieron tres perfiles A-A', B-B' y C-C' en dirección norte-sur, oeste-este, suroeste-noreste respectivamente (figura 10), todos ellos ubicados dentro de las zonas de mayor velocidad de subsidencia considerada dentro del rango -25 a 69 mm/año, las cuales están mayormente ubicadas en el sector norte-noreste-este del AVT. Para la selección del transecto de cada uno de los perfiles se estableció que éstos debían cumplir con la condición de intersectar por lo menos 3 multipiezómetros con la finalidad de obtener información de las columnas estratigráficas asociadas a los piezómetros con profundidades máximas de hasta 300 m.

Figura 10. Mapa de ubicación de perfiles A-A', B-B' y C-C' con respecto a la geología, posición de piezómetros y puntos PS.

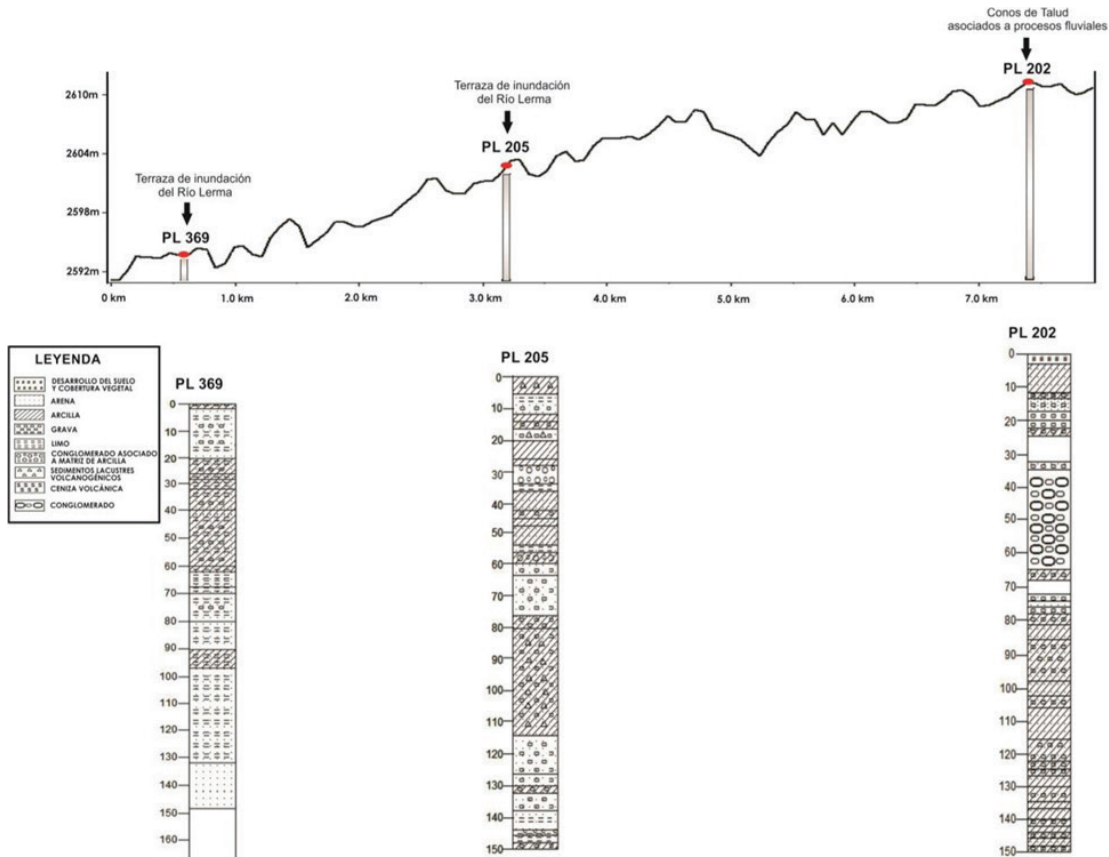


Fuente: elaboración propia.

La figura 11 representa el perfil A – A' (dirección norte – sur), que intersecta los multipiezómetros 369 – 205 – 202. Con respecto a sus columnas estratigráficas, se observa un aumento en los horizontes arcillosos de 40 m a 80 m de espesor y su intercalación con sedimentos lacustres volcanoge-

néticos hacia los multipiezómetros asociados a las terrazas de inundación del río Lerma (PL-205 y PL-202); encontrándose una mayor concentración de clastos de grava que indican un ambiente con mayor influencia volcánica (PL 369). Ya que el PL 205 fue el que presentó los mayores horizontes de arcilla (de hasta 80 m de espesor), fue seleccionado para realizar una comparación puntual entre los datos históricos del nivel de agua subterránea y puntos cercanos PS en un radio no mayor a los 800 m.

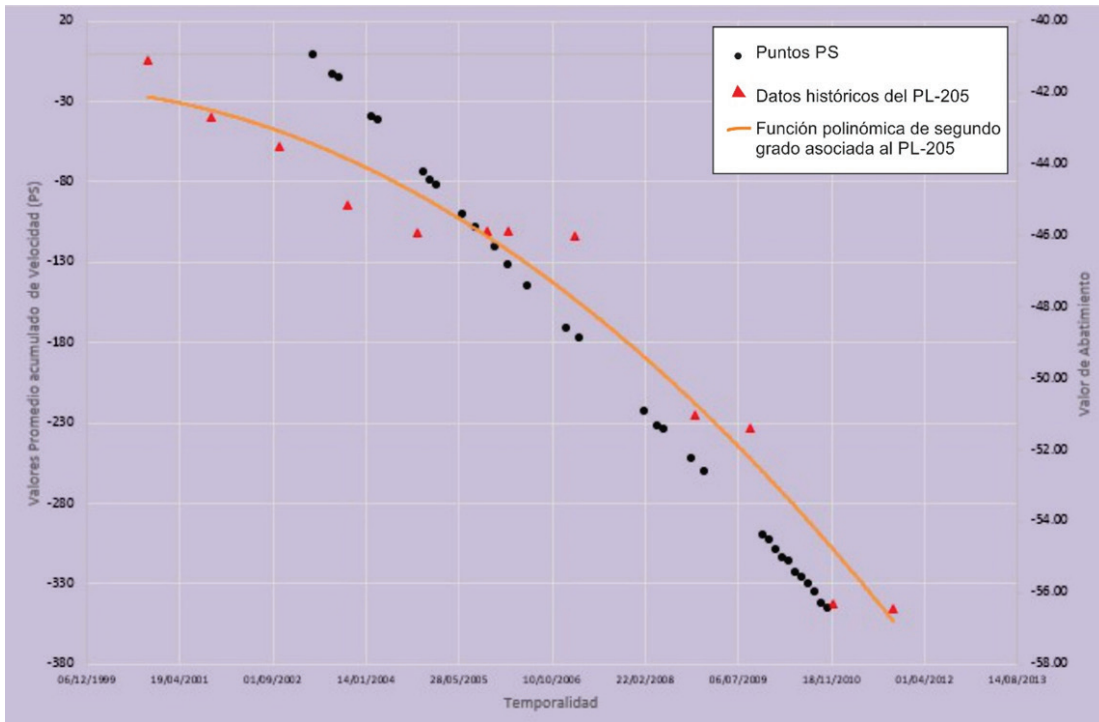
Figura 11. Perfil A – A' (Multipiezómetros 369 – 205 – 202).



Fuente: elaboración propia.

La figura 12 muestra la relación puntual para el periodo 2003-2010 (utilizando una función polinomial de segundo orden) y señala una relación directa entre la velocidad PS y el abatimiento del nivel de agua subterránea para sensores piezométricos mayores a 150 m de profundidad, con registros de niveles de abatimiento de hasta -58 m, mientras que el cálculo derivado de la técnica PS señala un valor acumulado de subsidencia de hasta -360.00 mm para el periodo considerado.

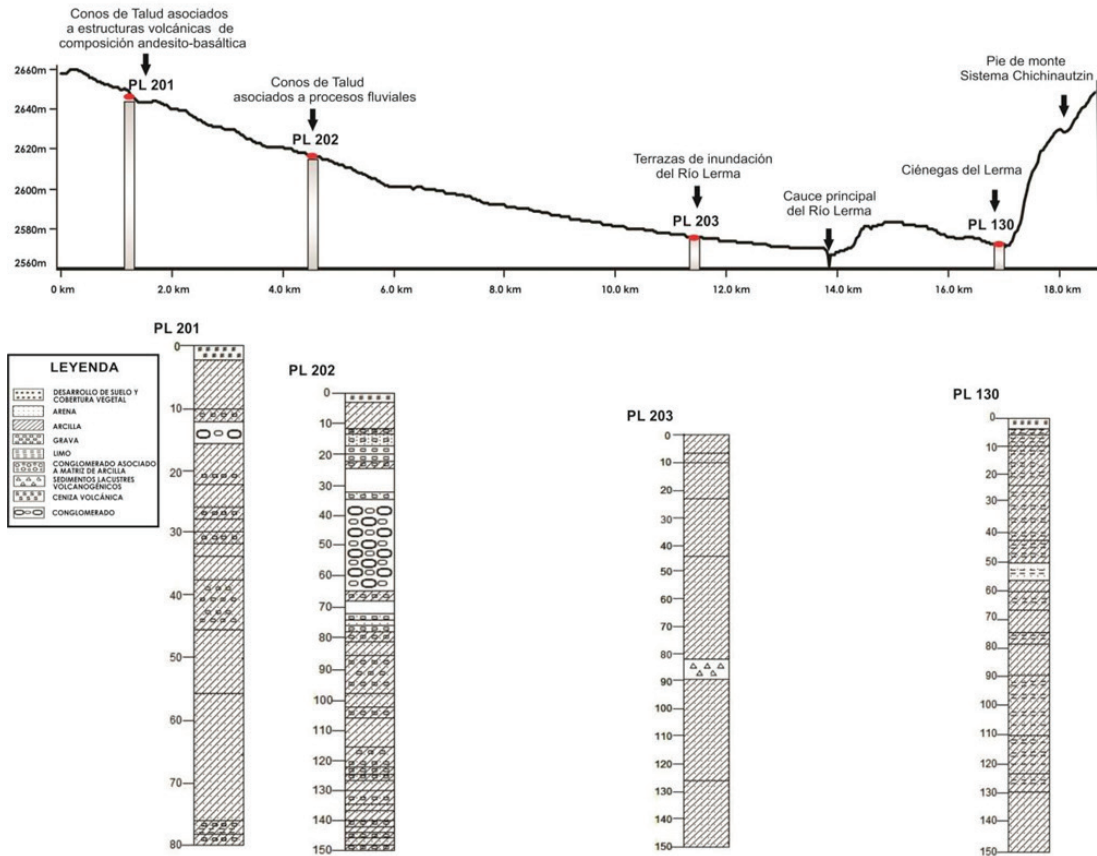
Figura 12. Relación puntual para el periodo 2003-2010 entre el PL-205 y puntos de subsidencia PS cercanos en un radio menor a 800 m.



Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, el perfil B – B' (dirección oeste – este) (figura 13), se encuentra conformado por las columnas estratigráficas de los PL-201, 202, 203 y 130. Al igual que el perfil A – A', las columnas se caracterizan por la intercalación de depósitos volcanogénéticos con potentes horizontes fluvio-lacustres. Sin embargo, las formas del relieve y la pendiente guardan una mayor importancia al encontrar definidos taludes asociados a procesos volcánicos y terrazas de inundación del río Lerma, y son los elementos morfológicos dominantes en el grosor y tipo de sedimentos que se depositan. Este es el caso de los PL 202 y 203, los cuales se ubican dentro de las terrazas del río Lerma, donde los procesos erosivos-acumulativos son dominantes, dando lugar a horizontes de arcilla máximos y consecutivos (de hasta 80 m aproximadamente) capaces de tener propiedades plásticas que pueden expresarse en una porción del relieve, sobre todo en condiciones de extracción de agua del subsuelo. Cabe destacar que los PL 202 y 203 coinciden en términos espaciales con una acumulación de puntos asociados al mayor rango de velocidad de subsidencia promedio (-25 a 69 mm/año) estimado a partir de la técnica PS.

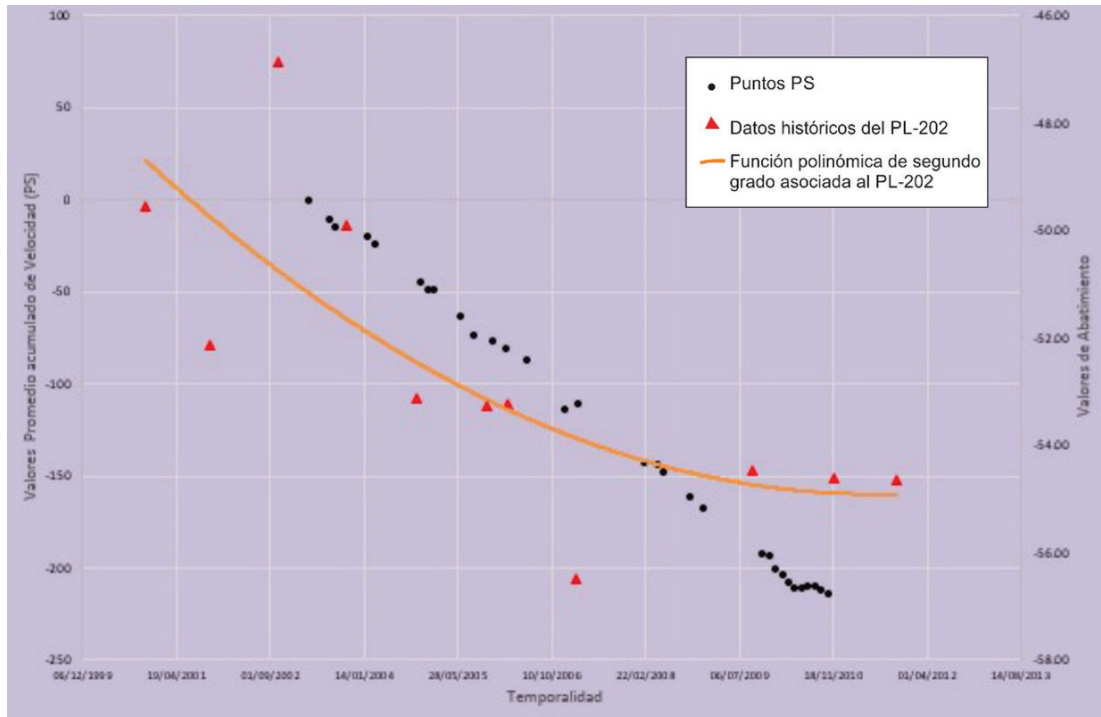
Figura 13. Perfil B – B' (Multipiezómetros 201 – 202 – 203 - 130).



Fuente: elaboración propia.

A pesar de que el PL-203 representó los horizontes de arcilla más desarrollados (de hasta 80 m aproximadamente), se optó por seleccionar el PL-202; ya que los registros históricos del nivel de agua subterránea de PL-203 no estaban completos. Así, en la figura 14 se muestra el comportamiento del PL 202 para los años 2003-2010 utilizando una función polinomial de segundo orden (de igual forma que en la gráfica anterior). En ella se identifica una disminución constante en los niveles de agua subterránea alcanzando valores máximos de abatimiento de hasta -57 m. Así mismo, la nube de puntos PS asociada al PL 202 indica un declive continuo en la deformación de la superficie del terreno de hasta -230 mm/año; sin embargo para el año 2008 la normalización de las dos variables consideradas presenta una intersección, indicando así una recuperación del nivel de agua subterránea a los -55 m.

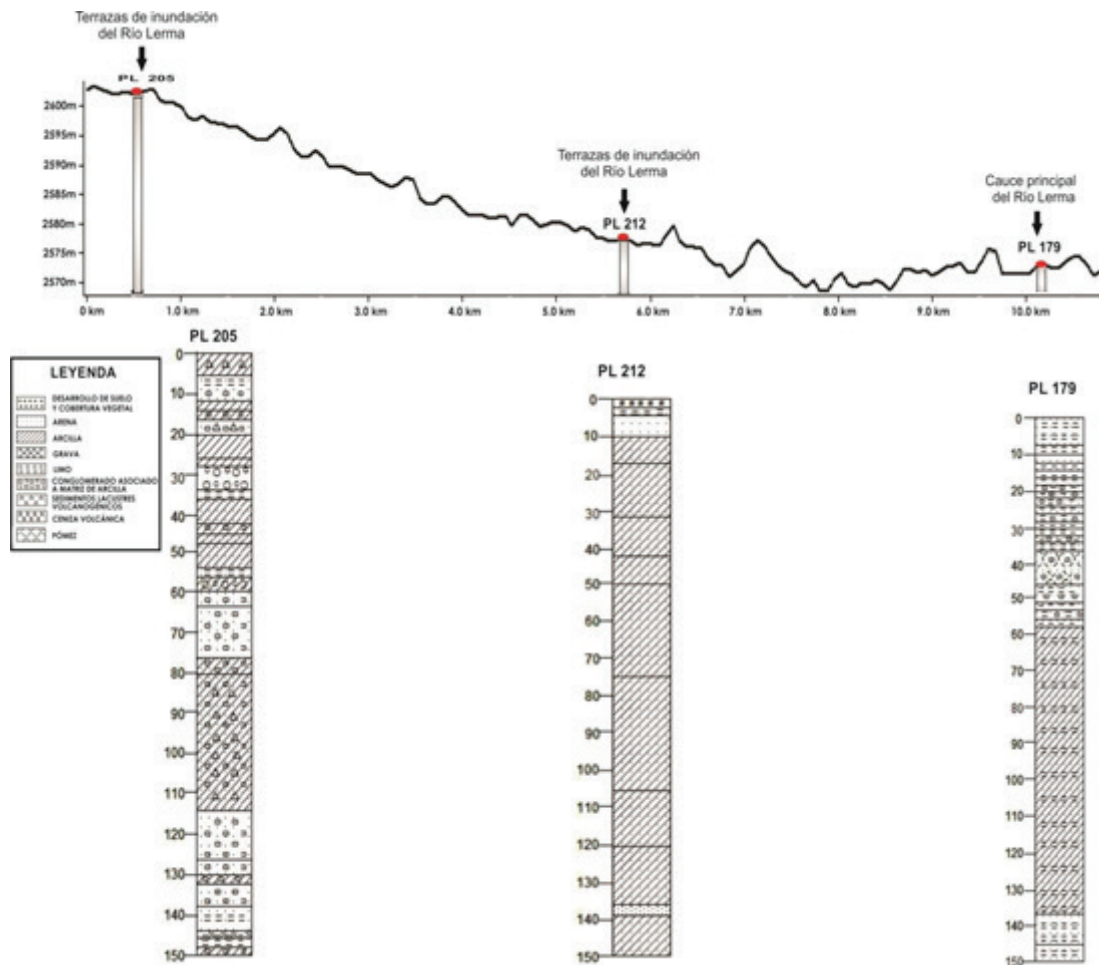
Figura 14. Relación puntual para el periodo 2003-2010 entre el PL-202 y puntos de subsidencia PS cercanos en un radio menor a 800 m.



Fuente: elaboración propia.

Finalmente, la figura 15 comprende el perfil C – C' (en la figura 9 corresponde al sector suroeste-noreste), el cual abarca los PL- 205 – 212 – 179. En términos de unidad morfológica los tres multi-piezómetros se encuentran a lo largo de la terraza de inundación del Río Lerma y, para el caso del PL 179, en la zona de transición de las Ciénegas del río Lerma. Ya que el PL- 205 fue anteriormente descrito, es importante destacar el desarrollo de horizontes arcillo-limo-arenosos derivados de tobas y cenizas de hasta 140 m para el PL 212 y 80 m para el PL- 179 con un mayor componente limo-arenoso. De acuerdo con los registros históricos del PL -212 con una ubicación del sensor a 138 m de profundidad (figura 16), a pesar de mostrar un comportamiento aleatorio y hasta niveles de recuperación a los -17 m para el año 2009, en términos generales muestra un decremento del nivel del acuífero de hasta -21 m, implicando un valor menor que la mitad del nivel del acuífero en comparación con los registros de los PL anteriormente descritos.

Figura 15. Perfil C - C' (Multipiezómetros 205 - 212 - 179).

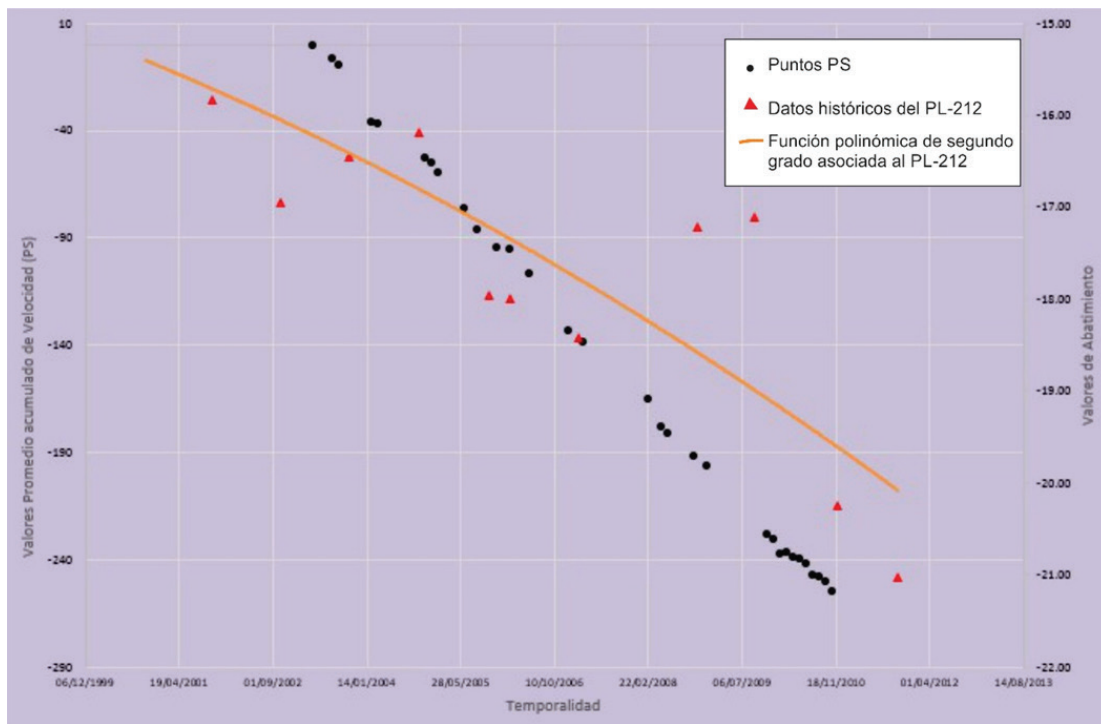


Fuente: elaboración propia.

De esta forma, de acuerdo a los perfiles topográficos y columnas descritas se observa un patrón espacial con respecto a los valores de deformación PS, considerando los siguientes argumentos: La estratigrafía de los multipiezómetros que muestran los horizontes más potentes de secuencias de arcillas, tales como, PL- 205 (70 m), PL 202 (80 m) y PL - 212 (140 m), corresponden con la llanura de inundación del río Lerma y se extienden hasta las distintas terrazas de inundación del mismo. Es decir, podemos encontrar una mayor secuencia de depósitos lacustres hacia la zona noreste-este que coincide con el cauce principal del río; pero coincide de igual forma con la mayor concentración de puntos asociados a las máximas velocidades promedio de deformación consideradas en el rango de los -25 a -69 mm/año de acuerdo con el método PS. Por otro lado, conforme la ubicación de los multipiezómetros (y por ende de sus columnas), éstos se concentran hacia las unidades morfológicas de depósitos de talud y pie de monte de las elevaciones cercanas, las dimensiones de los clastos que conforman las secuencias se tornan a mayores dimensiones. Lo anterior implica, por un lado, un libre flujo del agua subterránea; por otra parte, la concentración de puntos

PS de velocidad promedio de deformación de orden mínimo ubicados en esta área decrece considerablemente. Por tanto, los argumentos considerados son un indicativo de que la concentración de mayores velocidades de deformación del suelo coinciden de manera directa con las áreas que presentan horizontes de arcillas más desarrollados, las cuales de acuerdo con sus propiedades plásticas pueden tener su expresión en una porción del relieve, sobre todo en condiciones de extracción de agua del subsuelo de compresión y expansión ante la recarga y carencia de agua; por lo que son un indicativo de una manifestación física en superficie del abatimiento del acuífero por extracción de agua.

Figura 16. Relación puntual para el periodo 2003-2010 entre el PL-212 y puntos de subsidencia PS cercanos en un radio menor a 500 m.



Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

En este trabajo se emplearon técnicas de interferometría radar InSAR-*Persistent Scatterer*, que permitieron obtener datos puntuales de deformaciones superficiales del terreno con valores máximos de -69 mm/año, y confirmar que los procesos de subsidencia se expresan en la superficie debido a la cantidad de población que depende del recurso hídrico del Acuífero del Valle de Toluca.

Para justificar la expresión de los procesos de subsidencias en el terreno, se elaboraron perfiles topográficos asociados a la geografía superficial del Valle, de igual forma, se consideraron tanto curvas de aproximación de abatimiento histórico como datos puntuales del nivel del agua sub-

terránea derivados de los piezómetros involucrados a lo largo del transecto, y su relación con los puntos PS cercanos a los perfiles definidos. Derivado de ello, se observó una relación intrínseca entre las máximas curvas de hasta -40 m y valores puntuales de piezómetros selectos de abatimiento de hasta -57 m para profundidades mayores a los 150 m; las cuales coinciden espacialmente con secuencias estratigráficas de hasta 140 m de espesor conformadas en su mayoría por arcillas. Esta zona corresponde al sector norte-noreste-este, el cual presenta una concentración de pozos para uso industrial y agrícola al parecer de crecimiento constante a lo largo de los últimos años.

La aplicación de métodos como *Persistent Scatterer Interferometry* para la estimación diferencial de la fase asociada a deformaciones en el terreno es ideal en ambientes urbanos debido a la existencia de una mayor intensidad de retrodispersión de la señal al radar, lo cual facilita la selección de píxeles candidatos que conservan la fase a lo largo del tiempo. De igual forma, la integración de las geotecnologías y el monitoreo *in situ*, conforman herramientas con potencial para la toma de decisiones tanto inmediatas, durante algún evento de emergencia, como en los planes de desarrollo urbano, lo anterior con la finalidad de gestionar y atenuar el impacto socio-ambiental por la explotación intensiva del acuífero.

AGRADECIMIENTOS

La realización de este proyecto fue posible gracias a la adquisición de imágenes Envisat-ASAR mediante el proyecto de investigación celebrado con la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés), convenio CPlI79.

REFERENCIAS

- Agencia Espacial Europea, ESA. (2010). Recuperado de <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operationalmissions/envisat/operations>
- Ariel Consultores, S.A. (1996). *Estudio de simulación hidrodinámica y diseño de las redes de observación de los acuíferos de Calera, San Luis Potosí y Toluca*. Reporte técnico México: Comisión Nacional del Agua.
- Calderhead, A. I., Martel, R., Alasset, P. J., & Garfías, J. (2010). Land subsidence induced by groundwater pumping, monitored by D-InSAR and field data in the Toluca Valley, México. *Remote Sensing*, 36 (1), 9-23.
- Calderhead, A.I., Therrien, R., Rivera, A., Martel, R., & Garfías, J. (2011). Simulating Pumping Induced regional land subsidence with the use of InSAR and field data in the Toluca Valley, México. *Advance in Water Resources*, 34, 83-97.
- Chaussard, E., Wdowinski, S., Cabral, E. & Amelung, F. (2013). Land subsidence in central México detected by ALOS InSAR time-series. *Remote Sensing of Environment*, 140, 94- 106.
- Comisión Nacional del Agua (2008a). *El programa nacional hídrico 2007-2012, un soporte sólido para el desarrollo sustentable de México*. México, D.F.: Conagua.
- Comisión Nacional del Agua (2008b). *Plan de manejo de la cuenca del río Lerma en el Valle de Toluca*. Informe Final:

- Toluca, Estado de México: Conagua.
- Comisión Nacional del Agua (2010). *Atlas de la Comisión Nacional del Agua-Recursos hídricos*. México, D.F.: Semarnat-Conagua.
- Crosetto, M. (2005). Early detection and in-depth analysis of deformation phenomena by radar interferometry. *Engineering Geology*, 79 (1), 81-91.
- Díez, P. (2009). *Alternativas de administración racional de recursos hídricos en un acuífero sometido a sobreexplotación: Valle de Toluca, Estado de México* (Tesis de doctorado). UAEM, México.
- Expósito, J. L. (2012). *Características hidrodinámicas e hidroquímicas del acuífero multicapa del Valle de Toluca y sus implicaciones en la optimización de estrategias para la protección de la calidad del agua subterránea* (Tesis de doctorado). UAEM, México.
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2000). Nonlinear Subsidence rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38, (5), 2202-2211.
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39 (1), 1-20.
- Hanssen, R. (2001). *Radar Interferometry* (vol. 2). Netherlands, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Delft University of Technology.
- Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México (1994). *Carta Geológica 1:500,000: Toluca*. IFOMEGEN.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010, resultados definitivos*. México, D.F.: INEGI.
- Lira, J., & Dávila, N. (2011). *Tratamiento de Imágenes Ópticas y de Radar para el estudio de los bosques*. Madrid, España: FORCLIM Bosques y cambio climático, vol. 4.
- Pacheco, J. (2007). *Modelo de subsidencia del Valle de Querétaro y predicción de agrietamientos superficiales* (Tesis de doctorado). UNAM, México.
- Rodríguez-Castillo, R., & Rodríguez-Velásquez, I. (2006). Consecuencias sociales de un desastre inducido: subsidencia. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58 (2), 265-269.
- Sarscape 5.0. (2013). *Envi, EXELIS Visual Information Solutions*. Recuperado de <http://www.exelisvis.com>.
- Shanker, P., & Zebker, H. (2007). Persistent scatterer selection using maximum likelihood estimation. *Geophysical Research Letters*, 34 (22). doi: 10.1029/2007GL030806
- Zermeño, M., Pacheco, J., Mendoza, E., Arzate, J., & Arroyo, M. (2006). Fracturamiento y fallamiento de suelos, experiencias en la cd. de Aguascalientes, Ags. y Santiago de Querétaro, Qro. *Memorias del XXIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos* (pp. 793-801). Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

ZONIFICACIÓN CLIMÁTICO-AMBIENTAL URBANA MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN SATELITAL, GEOESTADÍSTICA Y SIG

Cristián Gonzalo Henríquez Ruiz, John Treimun Ríos y Jorge Rolando Qüense Abarzua*

INTRODUCCIÓN

A fines de la década pasada, por primera vez el porcentaje de población urbana superó a la población rural, y se proyecta que llegará a un 66% de la población mundial el año 2050 (United Nations, 2014). En varios países de Latinoamérica la población urbana ya superó el 80%; en el caso de Chile desde la década de 1940 traspasó este umbral, estimándose que al año 2020 alcanzará el 87% de la población nacional (INE, 2004). Esta explosión demográfica urbana se intensificará en las grandes ciudades, aunque las evidencias demuestran que las ciudades de tamaño medio son las que crecerán a mayores tasas (Henríquez, 2014). Tanto las metrópolis, como las grandes y pequeñas ciudades, constituyen espacios de enorme relevancia para determinar el nivel de sustentabilidad de los espacios habitados, especialmente ante escenarios de cambio climático (CC). En este marco, se debería generar un mayor conocimiento por parte de las autoridades, la comunidad científica y la sociedad en general, sobre el comportamiento de los climas y los fenómenos climáticos propios de las ciudades, tales como las islas de calor, inundaciones, eventos meteorológicos extremos, entre otros, para sustentar medidas y estrategias de mitigación/adaptación climática.

El último informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático tiene un capítulo especial (Capítulo 8) enfocado en las áreas urbanas, resaltando con ello la importancia que comienza a te-

* Instituto de Geografía de la Pontificia Universidad Católica de Chile, cghenriq@uc.cl, jptreimu@uc.cl, jquense@uc.cl

ner en la agenda pública la ciudad, en el contexto del cambio climático. En este informe se destaca que las ciudades seguirán creciendo rápidamente, concentrándose en los países de ingresos bajos y medios, los cuales recibirán el mayor impacto relacionado con desastres por fenómenos extremos. Estos incluyen el aumento en el nivel del mar, del oleaje por tormentas, de estrés por calor, de precipitaciones extremas, de inundaciones, de sequías, deslizamientos, de aridez y de contaminación del aire (IPCC, 2014).

Un ejemplo en este sentido corresponde a la intensificación del fenómeno de la Isla de Calor Urbana (ICU). Este fenómeno corresponde a la diferencia de temperatura entre el medio urbano construido y el espacio rural circundante. La ICU depende de varios factores, como por ejemplo, factores externos: la condición sinóptica (viento y nubosidad), el tiempo (fundamentalmente se presenta al anochecer y en los meses de primavera y verano), la localización geográfica (clima, topografía y tipo de alrededor rural), el tamaño de la ciudad; y de factores internos como son la forma de la ciudad (materiales, geometría, espacios verdes) y la función de la ciudad (uso de la energía, uso del agua y contaminación atmosférica) (Oke, 1987). Los impactos de la ICU incluyen problemas en el confort térmico, aumento de enfermedades respiratorias, alteración de los ciclos vegetales, entre otros, pero también pueden presentarse impactos positivos, como atenuar la temperatura en invierno (Henríquez, 2014).

En términos de los climas urbanos y la calidad ambiental en las ciudades, la vegetación presenta un gran potencial para combatir la generación de ICU. El conjunto de árboles, arbustos y césped que conforman un área verde, pueden influir sobre las condiciones climáticas y micro climáticas de un lugar, reduciendo la temperatura del aire, controlando el *smog* generado al interior de las ciudades, alterando la velocidad del viento, sombreando superficies, entre otros beneficios (Abkari & Konopacki, 2005). Diversos son los autores que han argumentado sobre los beneficios ambientales que posee la vegetación urbana, como Heisler, Grant, Grimmond y Souch (1995) quienes plantean que éstas son fundamentales para mitigar los efectos de las ICU, puesto que se configuran como verdaderas islas frías, generando al interior de ellas el fenómeno denominado brisas de parque durante la noche. En este mismo sentido, Abkari y Konopacki (2005) plantean que las áreas verdes insertas en el espacio urbano mejoran la calidad del ambiente, ya que secuestran CO₂, reducen la polución del aire, entre otros efectos. Romero, Molina, Moscoso, Sarricolea y Smith (2007) plantean que la vegetación urbana sombrea superficies y consume calor latente mediante el proceso de evapotranspiración, disminuyendo de esta forma la temperatura del aire al interior de la ciudad.

En general, se ha evidenciado que los climas presentes en las ciudades tienden a ser más cálidos que en sus alrededores (Oke, 1998; Whitford, Ennos, & Handley, 2001), debido a que la pavimentación de los suelos y la materialidad de las construcciones genera una alta absorción de energía solar y una elevada capacidad de retención térmica, dependiente de múltiples factores tales como

los diferentes tipos de materiales usados para la construcción, la altura de las edificaciones, de sus niveles de albedo y emisividad infrarroja, provocando un relevante impacto sobre el balance energético en la ciudad (Correa, Flores, & Lesino, 2003), con el consecuente incremento de los flujos de calor sensible a expensas de los flujos de calor latente.

En síntesis, la vegetación proporciona sombra, enfriamiento por evaporación, intercepción, almacenamiento e infiltración de las lluvias, entre otros beneficios positivos (Whitford et al., 2001). Las áreas verdes urbanas ofrecen espacios donde estos importantes procesos pueden desarrollarse (Whitford et al., 2001), ayudando a disminuir los efectos negativos de la urbanización y a mejorar la calidad de vida de la población. Estas funciones o servicios de la vegetación urbana se vuelven aún más importantes en un contexto de cambio climático, por lo cual muchas de las estrategias de adaptación y mitigación se basan en la gestión adecuada de la vegetación y espacios verdes en las ciudades (Gill, Handley, Ennos, & Pauleit, 2007; Bowler, Buyung-Ali, Knight, & Pullin, 2010). Por estas razones, la vegetación urbana presenta un gran potencial para enfriar ciudades, mitigar las ICU y el calentamiento global. Lo anterior es especialmente relevante en ciudades con veranos cálidos e incómodos (Potcher, Cohen, & Bitan, 2006), como es el caso de ciudades desérticas o mediterráneas, donde se ha registrado un creciente número de eventos meteorológicos extremos, tales como las olas de calor, olas de frío, sequías o inundaciones, entre otras.

De esta forma, el conocimiento acumulado ha permitido consolidar en la comunidad científica y en los diversos actores sociales, la hipótesis de que los problemas de gestión de las ciudades no son homogéneos. Esto se encuentra asociado a que incluso en el interior de la ciudad, las características topográficas, climáticas, o la distribución espacial de las viviendas, del comercio, de la industria o de las zonas verdes, entre otras, son evidentemente de carácter heterogéneo, determinando que las características locales tipifiquen una calidad ambiental diferente de acuerdo al sector en que se localicen en la ciudad (Escobar, 2006). No obstante, disponer de la información base para generar este tipo de índices e indicadores ambientales y poder analizar las condiciones locales de las ciudades, no siempre es posible en los países en vías de desarrollo.

Aunque a nivel internacional existen datos disponibles para realizar análisis ambientales a nivel regional, a escala local los vacíos de información temporal y espacial impiden realizar adecuados diagnósticos y evaluaciones ambientales, dificultando sostener medidas y estrategias específicas orientadas a los asentamientos humanos. En el caso de Chile, a nivel país se ha logrado avanzar progresivamente en la determinación de los impactos sectoriales del cambio climático, tal como lo refleja el informe de la CEPAL sobre los impactos en la economía del cambio climático (CEPAL, 2009). Sin embargo, a nivel más desagregado no existe una cobertura nacional uniforme de información socioambiental, por lo que combinar en una misma estructura analítica indicadores derivados de imágenes satelitales con la información socioambiental disponible, surge como una

opción viable que permite construir un sistema de indicadores ambientales urbanos más eficientes y a más bajo coste para la toma de decisiones (Santana, Escobar, & Capote, 2010).

En este sentido, la teledetección satelital ha realizado sus mayores aportes en la generación de información ambiental, a partir de la construcción de índices o indicadores que muestran el estado y la distribución de la vegetación y las características físicas de las áreas construidas; siendo el índice de vegetación de diferencia normalizada y la temperatura de la superficie los más usados (Santana et al., 2010; Freeman, 1993; Nichol & Wong, 2005). De esta forma, a través de la integración de los diferentes tipos de información satelital, se entiende como calidad climático-ambiental urbana como aquellos espacios urbanos resultantes de la combinación de distintos grados de vigorosidad vegetal con las condiciones térmicas del lugar, que configuran diferentes niveles de calidad.

En términos operacionales, los métodos utilizados para medir tanto la vegetación como la temperatura son muy diversos. Un primer grupo, relacionado con la estimación de la vegetación, se basa en realizar mediciones *in situ*, con tal de estimar los diferentes tipos de coberturas vegetales, altura de individuos, vigorosidad, entre otros aspectos. Del mismo modo, para el caso de la temperatura del aire o de la superficie, existen distintas aproximaciones operacionales, como los datos provenientes de estaciones meteorológicas, transectos móviles o *datalogers*. Sin embargo, estos métodos muchas veces resultan ser muy costosos y difíciles de obtener, sin mencionar el problema de la espacialización de las variables registradas. De esta forma, el uso de imágenes satelitales ofrece grandes ventajas para estimar estas variables de manera rápida y efectiva, especialmente cuando se requiere abarcar amplias superficies y distintas temporalidades.

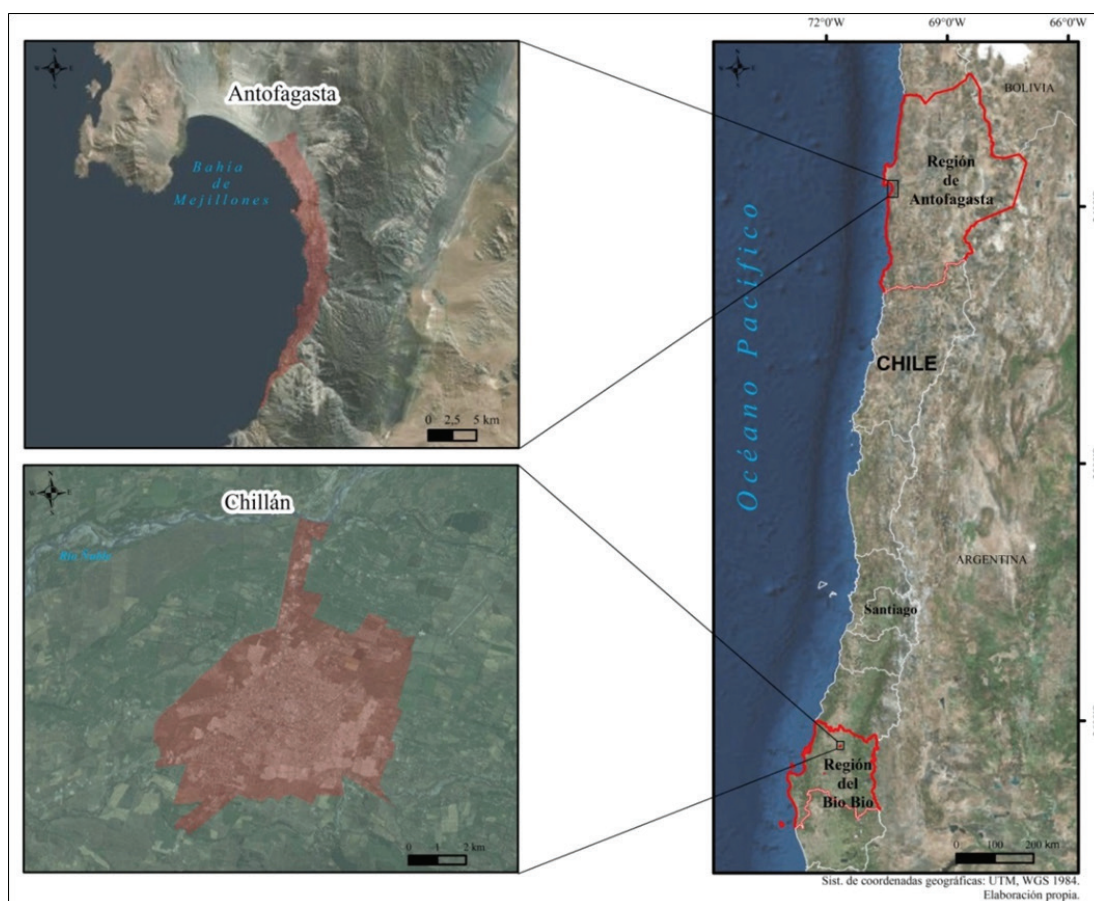
En esta investigación se presenta una estructura metodológica innovadora que busca aportar en la construcción de variables, indicadores e índices ambientales urbanos, capaces de caracterizar la calidad climático-ambiental urbana. Se propone la zonificación geoestadística de un índice sintético de calidad climático-ambiental, generado a partir de dos indicadores ambientales urbanos: la amplitud térmica anual y el porcentaje de superficie cubierta con vegetación para cada manzana de las ciudades analizadas.

METODOLOGÍA Y ÁREA DE ESTUDIO

ÁREA DE ESTUDIO

Se han escogido como casos de estudio la ciudad de Antofagasta, ubicada en el litoral del desierto de Atacama, y a la ciudad de Chillán, localizada en la depresión intermedia de Chile Central (figura 1). La elección de ambas ciudades se realizó teniendo en cuenta sus diferentes contextos geográficos y sus crecientes problemas ambientales, producto de su desarrollo económico y demográfico.

Figura 1. Localización y contexto geográfico de las ciudades de Antofagasta y Chillán.



Fuente: elaboración propia.

El clima de la ciudad de Antofagasta corresponde a un clima desértico con nublados abundantes, dominado por la influencia del Anticiclón del Pacífico que bloquea los sistemas frontales y genera una gran estabilidad por subsidencia inhibiendo las precipitaciones (CORFO, 2013). La temperatura media bordea los 16.7 °C, las precipitaciones son casi nulas (2.4 mm) y los vientos predominantes son S y SW. Por su condición desértica, una de las principales problemáticas ambientales es la carencia de áreas verdes tanto públicas como privadas. Al año 2014 presenta 2.6 metros cuadrados de áreas verdes con mantenimiento por habitante (SINIM, 2015). La vegetación predominante básicamente es de dos tipos: vegetación xerófila perenne, como el pimientó (*Schinus molle*), algarrobo (*Prosopis chilensis*) y tamarugos (*Prosopis tamarugo*); y vegetación introducida como palmeras y otras especies emplazadas en plazas y espacios públicos. Antofagasta es una de las ciudades con mayor crecimiento económico en el país debido al impacto de la actividad minera.

Por su parte, el clima de Chillán se caracteriza por ser templado cálido, con estación seca y lluviosa semejante, determinado por el movimiento latitudinal del Anticiclón del Pacífico. El monto de precipitación anual bordea los 1,050 mm, concentrándose entre mayo y agosto el 67.9% del

agua caída. El régimen pluviométrico invernal se asocia a las perturbaciones del frente polar que traslada centros de baja presión hacia el continente mediante vientos con dirección W a E y S a N (Mardones, Echeverría, & Jara, 2005). La vegetación urbana de la ciudad de Chillán, se caracteriza por la predominancia de especies ornamentales de tipo caducifolias, tales como plátanos orientales (*Platanus orientalis*) y también algunos representantes nativos del género *Nothofagus*. Es importante mencionar que esta ciudad en realidad es una conurbación compuesta entre Chillán y Chillán Viejo y que pertenece a dos comunas distintas. La ciudad se caracteriza por presentar altas temperaturas en los meses estivales. Además, cuenta con pocos parques públicos que permitan monitorear las condiciones térmicas. Chillán presenta 2.1 m²/hab, mientras que Chillán Viejo 1.1 m²/hab. (SINIM, 2015).

Respecto a eventos climáticos extremos destacan: el evento del aluvión de Antofagasta del 18 de junio de 1991, y en el caso de Chillán, una precipitación extrema que originó graves inundaciones, anegamientos, deslizamientos y desbordes de cauces entre los días 11 y 12 de julio de 2006. Ambos fenómenos se podrían relacionar con una intensificación de los efectos del cambio climático, el fenómeno climático ENSO, condiciones climáticas locales y a una desaprensiva ocupación del uso de suelo, aspectos que afectan a la mayor parte de centros urbanos del país.

MÉTODO

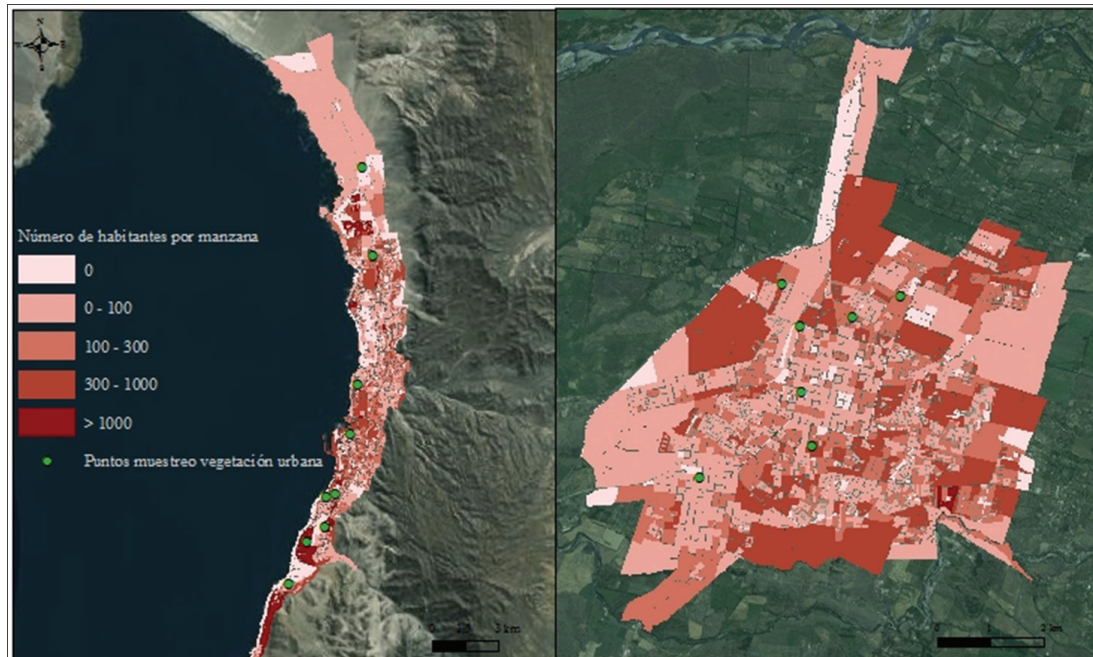
La presente investigación intenta determinar zonas de calidad climático-ambiental urbana en las ciudades de Antofagasta y Chillán a partir del comportamiento espacial de indicadores e índices ambientales, obtenidos a través de la integración de técnicas de teledetección satelital, métodos geoestadísticos y SIG. El énfasis de esta comunicación es presentar una estructura metodológica que sirva de base para caracterizar la calidad ambiental de las ciudades, a escala de manzana urbana, replicable para las principales ciudades de Chile.

La estructura metodológica se basó en la construcción de un índice sintético de calidad climático-ambiental urbana, generado a partir de dos indicadores ambientales: la superficie promedio cubierta con vegetación y la amplitud térmica anual, obtenidos a nivel de manzana urbana¹ (ver figura 2). Ambos indicadores ambientales se generaron a través del procesamiento de los insumos proveniente de las plataformas satelitales Landsat 8 (OLI y TIRS) y MODIS, los que fueron sintetizados en dos variables físicas del medio ambiente urbano: el índice de vegetación de diferencia normalizada o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) y la temperatura superficial terrestre (TST). Este proceso en general resulta ser una labor compleja debido al gran número de factores y datos que influyen en su determinación. No obstante, el desarrollo de diversos algoritmos y el

1 Una manzana es una unidad territorial urbana que da forma a la estructura de los centros poblados y que es utilizada como unidad menor y básica de la información censal (INE, 2008).

aumento de la capacidad computacional impulsado por el avance tecnológico, permiten en la actualidad su obtención de manera más ágil y precisa.

Figura 2. Manzanas urbanas, distribución espacial de la población y puntos de muestreo de vegetación en las ciudades de Antofagasta y Chillán.



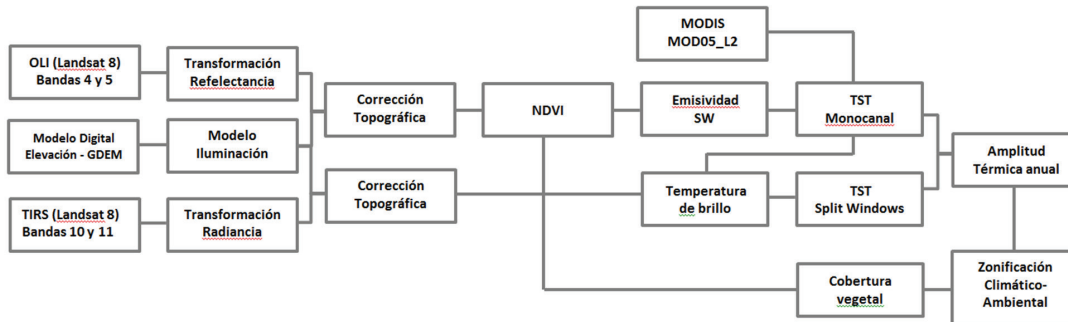
Fuente: elaboración propia.

Los pasos metodológicos fueron integrados en el Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcGIS, mediante su consola de programación gráfica *Model Builder*, con la que se automatizó la totalidad de los procesos, usando tres insumos espaciales como datos de entrada: un modelo digital de elevación del terreno, el vapor de agua atmosférico y las bandas espectrales de Landsat 8 (figura 3).

Para estimar la temperatura superficial terrestre (TST) se utilizaron dos algoritmos diferentes: el algoritmo monocanal o *single channel* (SC), propuesto por Jiménez-Muñoz y Sobrino (2003), y el algoritmo bicanal o *split windows* (SW), propuesto por Jiménez-Muñoz, Cristóbal, Sobrino y Skokovic (2014). Ambos métodos fueron escogidos debido a su flexibilidad en términos de condiciones atmosféricas y a su adaptabilidad a distintos tipos de sensores con bandas espectrales en la ventana atmosférica (longitudes de onda en el rango de 10 – 12 μm). Para la estimación de la TST ello se necesitó la generación de cinco magnitudes fundamentales: la radiancia, la temperatura de brillo en el sensor, la emisividad de la superficie, el contenido de vapor de agua en la atmósfera y las longitudes de onda de las bandas térmicas consideradas. Cuatro de estas magnitudes se pueden obtener a través del procesamiento de la información digital (DN en inglés) de las bandas espectrales de cada imagen Landsat, mientras que el vapor de agua provino del sensor MODIS.

Por otro lado, la superficie cubierta con vegetación se estimó utilizando como base al NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) (Myneni, Hall, Sellers, & Marshak, 1995), sobre el cual se realizó un muestreo puntual en sitios con reconocida presencia de vegetación urbana en distintas épocas del año. Además, se generó una serie de tiempo del vigor vegetacional para el periodo 2013-2014, determinándose los valores umbrales en cada ciudad y definiendo a partir de ellos la superficie cubierta con vegetación en ambas ciudades.

Figura 3. Esquema del flujo metodológico.



Fuente: elaboración propia.

DATOS DE ENTRADA

En este estudio los datos utilizados se obtuvieron a partir de tres plataformas de datos diferentes. La primera de ellas es la creada por la *United States Geological Survey* (USGS), a través de sus aplicaciones *Earth Explorer* y *Glovis*, de las cuales se obtuvieron los productos de las plataformas satelitales Landsat. La segunda fuente corresponde al programa *ASTER Global Digital Elevation Model* (ASTER GDEM), desarrollado en forma conjunta por la NASA y el gobierno japonés, la que pone a disposición del público un modelo digital de elevación (MDE) global de alta resolución. La tercera fuente es el sistema *Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System* (LAADS)², el que provee acceso a la información entregada por el *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), a bordo de las plataformas satelitales Terra y Aqua. El mapa base utilizado, como unidad espacial para realizar el análisis geoespacial, se obtuvo del Instituto Nacional de Estadísticas (INE, 2013), correspondiente a las manzanas urbanas de Antofagasta y Chillán utilizadas para el Censo de Población y Vivienda del año 2012.

² Disponible en <http://ladsweb.nascom.nasa.gov>

Tabla 1. Resoluciones espaciales y espectrales de las bandas Landsat 8.

Banda espectral	Sensor	Resolución	
		Espacial (m)	Espectral (mm)
B4	OLI	30	0.64 – 0.67
B5			0.85 – 0.88
B10	TIRS	100 (30)*	10.60 – 11.19
B11			11.5 – 12.51

*Las bandas termales se entregan remuestreadas a 30 metros por la USGS. Fuente: Roy et al. (2014).

Tabla 2. Parámetros y variables obtenidas de las imágenes Landsat 8 utilizadas.

Ciudad	Nombre imagen	Fecha y hora local (UTC-3)	Elevación solar (°)	Azimut solar (°)	Variable obtenida
Antofagasta	1: LC80010762013109LGN01	19-04-2013 11:38	44.98	43.42	NDVI
	2: LC80010762013157LGN00	06-06-2013 11:39	35.99	34.29	NDVI/TST
	3: LC80010762013173LGN00	24-07-2013 11:38	37.35	38.26	NDVI/TST
	4: LC80010762013253LGN00	10-09-2013 11:38	50.29	49.42	NDVI
	5: LC80010762013365LGN00	31-12-2013 11:38	61.65	96.31	NDVI
	6: LC80010762014032LGN00	01-02-2014 11:38	57.99	85.48	NDVI/TST
	7: LC80010762014048LGN00	17-02-2014 11:37	56.09	76.69	NDVI/TST
	8: LC80010762014064LGN00	05-03-2014 11:37	53.84	67.05	NDVI
Chillán	1: LC82330852013102LGN01	12-04-2013 11:36	35.71	41.02	NDVI
	2: LC82330852013134LGN01	14-05-2013 11:42	27.77	34.00	NDVI/TST
	3: LC82330852013230LGN00	18-08-2013 11:36	31.94	39.14	NDVI/TST
	4: LC82330852013278LGN00	05-10-2013 11:36	48.87	48.23	NDVI
	5: LC82330852013358LGN00	24-12-2013 11:35	59.35	75.02	NDVI
	6: LC82330852014025LGN00	25-01-2014 11:35	54.34	71.19	NDVI/TST
	7: LC82330852014041LGN00	10-02-2014 11:35	51.08	65.68	NDVI/TST
	8: LC82330852014089LGN00	30-03-2014 11:34	39.14	45.87	NDVI

Fuente: elaboración propia.

Las imágenes satelitales utilizadas fueron registradas por los sensores *Operational Land Imager* (OLI) y *Thermal Infrared Sensor* (TIRS), a bordo de la plataforma satelital Landsat 8 (tablas 1 y 2). A su vez, se obtuvo un Modelo Digital de Elevación (MDE) del tipo ASTER GDEM, remuestreado a 30 metros de resolución espacial. Desde la aplicación web del LAADS se descargaron las coberturas con el contenido de vapor atmosférico registradas en el infrarrojo cercano (tabla 3).

Tabla 3. Imágenes MODIS utilizadas: metadatos.

Ciudad	Nombre imagen MODIS	Fecha y hora (UTC-3)
Antofagasta	MOD05_L2.A2013157.1500.051.2013157191936	06-06-2013 12:40
	MOD05_L2.A2013173.1540.006.2015068161643	24-07-2013 12:40
	MOD05_L2.A2014032.1540.006.2015073001216	01-02-2014 12:40
	MOD05_L2.A2014048.1540.006.2015073113931	17-02-2013 12:40
Chillán	MOD05_L2.A2013141.1405.006.2015067235443	14-05-2013 11:05
	MOD05_L2.A2013230.1535.051.2013231050356	18-08-2013 12:35
	MOD05_L2.A2014025.1545.051.2014025233258	25-01-2014 12:45
	MOD05_L2.A2014041.1535.006.2015073082852	10-02-2014 12:35

Fuente: elaboración propia.

Homologación de insumos

Antes de procesar y estimar las variables de entrada fue necesario realizar una etapa de pre procesamiento y homologación de los datos espaciales. Las imágenes se homologaron, tanto en términos de estructura lógica y formato, como también en términos de localización geográfica. Respecto a la primera fase, se trabajó con las bandas espectrales de Landsat 8 y el MDE ASTER GDEM en formato TIFF (*Tagged Image File Format*). No obstante la imagen con el contenido de vapor atmosférico proporcionada por el LAADS se entrega en un archivo con extensión HDF (*Hierarchical Data Format*). La mayoría de las plataformas SIG disponibles no leen en forma correcta el formato HDF, por lo que fue necesario utilizar el programa HEG-EOS, versión 2.1, provisto por la NASA³. Este *software* es capaz de procesar los archivos con formato HDF, nativo de las imágenes MODIS, entregando el producto MOD05_L2 georeferenciado en formato GEOTIFF, que contiene la información de vapor de agua atmosférica a un kilómetro de resolución espacial.

Tanto la extensión espacial de los datos como su sistema de referencia, la resolución espacial y los métodos de remuestreo, debieron ser definidos antes de realizar cualquier tipo de corrección, para lo cual se siguieron los siguientes pasos:

- selección del sistema de referencia UTM, datum WGS 1984 y huso 19 S;
- corrección de los desplazamientos métricos de las imágenes satelitales en relación a la cobertura de bloques o manzanas urbanas del Instituto Nacional de Estadísticas (INE, 2008).
- extracción de las bandas espectrales y el vapor de agua atmosférica, utilizando una máscara para el área de estudio;

³ Disponible en <http://newsroom.gsfc.nasa.gov/sdptoolkit/HEG/HEGHome.html>

- remuestreo de la cobertura con el vapor de agua atmosférico (sensor MODIS) a una resolución espacial de 30 metros;
- eliminación de las celdas con valores cero y saturados;
- corrección radiométrica de las bandas termales 10 y 11 (sensor TIRS)⁴;
- transformación de los valores digitales a reflectancia de las bandas 4 y 5 (sensor OLI).

Corrección topográfica y obtención del NDVI

El ángulo de incidencia de los rayos solares en la superficie se encontró usando los valores del azimut y de la elevación solar, junto a los valores de la pendiente del terreno y su orientación, ambas obtenidas a través del procesamiento del MDE ASTER. Esto se logró por medio de un modelo de iluminación, mediante la expresión dada por Colby (1991):

$$\text{Cos}(i) = \text{Cos}(\theta_s)\text{Cos}(\theta_n) + \text{Sen}(\theta_s)\text{Sen}(\theta_n)\text{Cos}(\phi_s - \phi_n) \quad (1)$$

Dónde:

i = Ángulo de incidencia rayos solares

θ_s = Ángulo cenital solar (complemento ángulo de elevación solar)

θ_n = Pendiente de la superficie

ϕ_s = Azimut solar

ϕ_n = Orientación de la superficie

Considerando en la expresión (1) que la pendiente de la superficie es nula (superficie de referencia), entonces es posible aplicar el algoritmo de corrección topográfica C, propuesto por Teillet, Guindon y Goodenough (1982), mediante la expresión:

$$L_{\lambda\text{Corr}} = L_{\lambda} \left[\frac{\text{Cos}(v) + C}{\text{Cos}(i) + C} \right] \quad (2)$$

Donde:

$L_{\lambda\text{Corr}}$ = Radiancia corregida (en el caso de las bandas 4 y 5 se consideró la reflectancia)

$\text{Cos}(v)$ = Coseno para una superficie horizontal

⁴ Fuente de algoritmos para transformación de número digital (DN) a radiancia-reflectancia y temperatura de brillo: http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php

$C = \frac{b}{m}$, obtenidos de la regresión lineal $L_\lambda = b + m \cos(i)$, ajustada usando mínimos cuadrados entre la radiancia o reflectancia, según correspondiera, de cada banda espectral y el modelo de iluminación.

El índice vegetacional utilizado como variable auxiliar para estimar la emisividad superficial y la cobertura vegetacional fue el NDVI, obtenido mediante la expresión:

$$NDVI = \frac{\rho_4 - \rho_5}{\rho_4 + \rho_5} \quad (3)$$

Siendo: ρ_4 y ρ_5 las reflectividades de las bandas 4 y 5 del sensor OLI.

OBTENCIÓN DE LA EMISIVIDAD SUPERFICIAL Y TEMPERATURA DE BRILLO

Emisividad algoritmo monocanal

La emisividad (ε_{sc}) se estimó considerando el conocimiento a priori de la emisividad de algunas superficies y su relación estadística con algunos valores umbrales del logaritmo natural del NDVI. Para calcular la emisividad se usaron los valores umbrales del índice vegetacional, rangos propuestos por Van de Griend y Owe (1993).

Emisividad algoritmo split-window

La emisividad media para el algoritmo bicanal y su variación espectral ($\Delta\varepsilon_{sw}$) fue estimada por el método de los umbrales del NDVI, esta vez propuesto por Sobrino y Raissouni (2000). El método consiste en la segmentación de la cobertura del NDVI según heterogeneidad, rugosidad, zonas con suelos desnudos o completamente cubiertos por vegetación. Los algoritmos para el cálculo de ε_{sw} y $\Delta\varepsilon_{sw}$ se detallan en Carlson y Ripley (1997) y Parra et al. (2006).

AMPLITUD TÉRMICA ANUAL Y SUPERFICIE CUBIERTA POR VEGETACIÓN

Algoritmo monocanal o single channel (SC)

Las funciones de transferencia atmosférica ψ_1 , ψ_3 , ψ_2 , y, fueron obtenidas como función del vapor de agua atmosférico (w), MOD05_L2 según las expresiones y parámetros considerados para la banda termal centrada en los 10.9 μm del sensor TIRS (banda 10) (Jiménez-Muñoz et al., 2014):

$$\psi_1 = 0.04019 w^2 - 0.02916 w + 1.01523 \quad (4)$$

$$\psi_2 = -0.38333 w^2 - 1.50294 w + 0.20324 \quad (5)$$

$$\psi_3 = 0.00918 w^2 + 1.36072 w - 0.27514 \quad (6)$$

Para estimar la TST (°C) se integraron todos los parámetros generados en el algoritmo monocanal (SC) generalizado de Jiménez-Muñoz y Sobrino (2003):

$$TST_{SC} = \gamma \left[\varepsilon^{-1} (\psi_1 L_{\lambda Corr} + \psi_2) + \psi_3 \right] + \delta - 273,15 \quad (7)$$

Con las siguientes aproximaciones de los parámetros gamma (γ) y delta (δ):

$$\gamma = \left\{ \frac{c_2 L_{\lambda Corr}}{T_{B10}^2} \left[\frac{\lambda^4}{c_1} L_{\lambda Corr} + \lambda^{-1} \right] \right\}^{-1} \quad (8)$$

$$\delta = -\gamma L_{\lambda Corr} + T_{B10} \quad (9)$$

Dónde:

$L_{\lambda Corr}$ = Radiancia espectral corregida topográficamente de la banda 10 (TIRS-1)

T_{B10} = Temperatura de brillo banda 10 (° K)

λ = Centro del rango de longitud de onda de la banda 10

Algoritmo bicanal o split-window (SW)

Las dos bandas termales del TIRS entregan información en dos canales térmicos situados en distintas longitudes de onda de la ventana atmosférica, permitiendo utilizar la técnica *Split-window*. Su formulación es la siguiente (Jiménez et al., 2014):

$$TST_{SW} = c_0 + T_{B10} + c_1 (T_{B10} - T_{B11}) + c_2 (T_{B10} - T_{B11})^2 + (c_3 + c_4 w)(1 - \varepsilon) + (c_5 + c_6 w) \Delta \varepsilon \quad (10)$$

Siendo:

c_i = Coeficientes *split-window* (ver tabla 4)

T_{B11} = Temperatura de brillo banda 11 (° K)

$\varepsilon = \varepsilon_{sw}$

$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_{sw}$

Tabla 4. valores de coeficientes split-window.

Coeficiente	
0	-0.268
1	1.378
2	0.183
3	54.30
4	-2.238
5	-129.20
6	16.40

Fuente: Jiménez et al. (2014).

Estimación de la amplitud térmica anual

Una vez estimada la TST con los métodos SC y SW, se procedió a obtener un compuesto con el promedio estacional, utilizando las temperaturas superficiales del invierno 2013 y del verano 2014, obtenidas para ambas ciudades. La información contenida en las coberturas raster con los promedios de temperatura superficial estacional de ambas ciudades, se utilizó como base para extraer estadísticas zonales. Para ello se utilizaron las coberturas vectoriales con las manzanas urbanas de ambas áreas de estudio, siendo atribuidas con el valor promedio de cada píxel contenido en las unidades de análisis espacial. De esta forma, se obtuvo el primer indicador ambiental urbano, dado por la amplitud térmica anual o la diferencia entre la temperatura superficial promedio del verano 2014 y el invierno 2013:

$$A_t = TST_{ver} - TST_{inv} \quad (11)$$

Dónde:

A_t = Amplitud térmica anual

TST_{ver} = TST promedio verano 2014

TST_{inv} = TST promedio invierno 2013

Estimación de la superficie con vegetación

En la estimación de la superficie cubierta con vegetación por manzana urbana, el segundo indicador ambiental urbano propuesto, se utilizó como base la cobertura con el NDVI obtenido para el periodo 2013-2014. A partir del comportamiento temporal del índice vegetacional y los puntos de muestreo registrados en sectores con reconocida presencia de vegetación en las ciudades seleccionadas, se determinó el ciclo fenológico de los distintos tipos de vegetación, usando sus valores umbrales para obtener la superficie cubierta con vegetación en ambas ciudades.

Se consideraron las fases iniciales y medias de los ciclos fenológicos de la vegetación urbana, coincidentes con la amplitud máxima del índice vegetacional en las estaciones de invierno y verano. El porcentaje de superficie cubierta con vegetación por manzana se encontró con la expresión:

$$P_{veg} = \frac{50}{Sm} (Sv_i + Sv_v) \quad (12)$$

Considerando:

P_{veg} = Porcentaje promedio de superficie cubierta con vegetación por manzana urbana

Sm = Superficie de la manzana urbana (m^2)

Sv_i = Superficie de la manzana cubierta con vegetación en invierno (m^2)

Sv_v = Superficie de la manzana cubierta con vegetación en verano (m^2)

ZONIFICACIÓN DE LA CALIDAD AMBIENTAL URBANA

Análisis geoestadístico y reclasificación espacial de los indicadores ambientales

Se procedió a realizar un análisis geoestadístico de los nuevos indicadores ambientales utilizando el índice de Moran Local (Anselin, 1995), definiendo la distancia euclidiana como norma espacial y la vecindad de cada manzana urbana. De esta manera, se identificaron con significancia estadística zonas *cluster* y *outliers* espaciales de cada indicador ambiental analizado. La expresión de Anselin, adaptada con la amplitud térmica anual, pero igualmente aplicada al porcentaje de superficie con vegetación, se muestra en la expresión:

$$I_i = \frac{A_i - \bar{A}}{S_i^2} \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{i,j} (A_j - \bar{A}) \quad (13)$$

Con:

I_i = Estadístico local de asociación espacial de la manzana (Índice de Moran Local)

A_i = Amplitud térmica anual de la manzana

\bar{A} = Amplitud térmica anual promedio

$w_{i,j}$ = Peso espacial entre la unidad y determinado por los parámetros de vecindad

La expresión utilizada para obtener la varianza, S_i^2 , fue:

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n (A_{pj} - \bar{A})^2}{n-1} - \bar{A}^2 \quad (14)$$

En este caso, la interpretación de un valor positivo de I indica que una manzana tiene manzanas vecinas con valores de amplitud térmica anual similares (altos o bajos), siendo parte de un *cluster*. Un valor negativo de I indica que la manzana tiene valores de amplitud térmica disimiles a sus manzanas vecinas, siendo un *outlier* espacial. Esta forma de caracterización, basada en la ponderación espacial y en la identificación topológica de agrupamientos o aislamientos espaciales, permitió realizar la posterior reclasificación espacial de los indicadores ambientales generados.

El *software* ArcGIS 10.2, a través de su herramienta *Cluster and Outlier Analysis* facilita la obtención del estadístico con un nivel de confianza del 95%, entregando a la variable agrupada en sectores de alta o baja amplitud térmica, como también a sus *outliers*, en 5 categorías: HH (*High-High*), HL (*High-Low*), LH (*Low-High*), LL (*Low-Low*), además de las manzanas urbanas que no presentan un patrón de agrupamiento espacial con significancia estadística (NS). Debido a que el índice de Moran Local es una medida relativa, solo puede ser interpretado con los parámetros resultantes del test estadístico que determina si la hipótesis nula (que supone que los elementos o unidades tienen un comportamiento espacial aleatorio) se cumple o no (Mitchell, 2005).

Los parámetros de decisión utilizados en el test estadístico son el p -valor (probabilidad de que el patrón espacial observado sea aleatorio) y el z -score (rangos de desviaciones estándar), dados por las expresiones:

$$z_{I_i} = \frac{I_i - E[I_i]}{\sqrt{V[I_i]}} \quad (15)$$

Con:

$$E[I_i] = - \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij}}{n-1} \quad (16)$$

$$V[I_i] = E[I_i^2] - E[I_i]^2 \quad (17)$$

Se definió que se trabajaría con un 95% de nivel de confianza estadística. El rango de los valores del z -score, en relación al intervalo de confianza definido, se estableció como (-1.96 – 1.96), mientras que el valor crítico del p -valor para rechazar la hipótesis nula fue 0.05.

Obtención del índice sintético de calidad ambiental

El índice sintético de calidad ambiental fue obtenido con ayuda de la reclasificación espacial de los indicadores ambientales (tabla 5). Se determinó que la escala de valoración para ambos indicadores sería inversa, valorando de mejor manera las agrupaciones de manzanas con registros bajos

de amplitud térmica anual (A_i), mientras que en el caso de la superficie cubierta con vegetación (P_{veg}) se valoró de mejor manera aquellas agrupaciones de manzanas con alto porcentaje. Mediante álgebra de mapas, se sumaron ambas coberturas reclasificadas manzana a manzana, generando un índice sintético de calidad ambiental con valores entre -4 y 4.

Tabla 5. Categorías de reclasificación espacial para los indicadores ambientales definidos.

Categoría		
HH: Agrupación de manzanas con valores altos	-2	2
HL: Manzanas con valores altos rodeadas de manzanas con valores bajos	-1	1
LH: Manzanas con valores bajos rodeadas de manzanas con valores altos	1	-1
LL: Agrupación de manzanas con valores bajos	2	-2
NS: Agrupación o aislamiento espacial no significativo estadísticamente	0	0

Fuente: elaboración propia.

Este índice se normalizó y jerarquizó en cinco categorías mediante la asignación de puntajes en relación a los rangos adoptados (Carvacho, 2011), teniendo en cuenta los valores umbrales del índice sintético y su media, mediante la expresión:

$$P_i = \begin{cases} P_{med} + (x_i - \bar{X})R_{sup}, & \text{si } x_i \geq \bar{X} \\ P_{min} + (x_i - X_{min})R_{inf}, & \text{si } x_i < \bar{X} \end{cases} \quad (18)$$

Dónde:

P_i = Puntaje a asignar a la manzana

x_i = Valor observación de la variable

\bar{X} = Promedio variable

P_{med} = Valor del puntaje asignado al valor promedio

P_{min} = Valor del puntaje asignado al valor mínimo

P_{max} = Valor del puntaje asignado al valor máximo

X_{min} = Valor mínimo variable

X_{max} = Valor máximo variable

$$R_{inf} = \frac{P_{med} - P_{min}}{\bar{X} - X_{min}} \quad \text{y} \quad R_{sup} = \frac{P_{max} - P_{med}}{X_{max} - \bar{X}}$$

La tabla 6 muestra los valores asignados a cada puntaje, obteniéndose una cobertura con cinco categorías de calidad climático-ambiental urbana: Muy alta, Alta, Media, Baja, y Muy baja.

Tabla 6. valores de reclasificación para el índice sintético de calidad ambiental.

Valor Índice	Valor asignado	Categoría
P_{min}	1	Muy baja
P_1	2	Baja
P_{med}	3	Media
P_2	4	Alta
P_{max}	5	Muy alta

Fuente: elaboración propia.

RESULTADOS

Las dos aproximaciones metodológicas que se utilizaron para estimar la TST (métodos SC y SW) presentaron notorias diferencias espaciales y estadísticas, permitiendo complementar el análisis de la temperatura superficial y la amplitud térmica urbana. Por su parte, los valores extraídos de la cobertura con el NDVI, fueron utilizados como parámetros para determinar la superficie cubierta con vegetación. Los principales resultados obtenidos para las variables físicas seleccionadas del ambiente urbano, se resumen en las tablas 7 y 8.

Tabla 7. Estadísticos de la temperatura superficial terrestre ($^{\circ}$ c) (2013-2014).

Estadístico		Ciudad	
		Antofagasta	Chillán
Temperatura superficial invierno ($^{\circ}$ C)	Min.	9.59	-3.02
	Max.	25.64	11.58
	Media	18.58	5.99
	Desv. estándar	1.52	2.86
Temperatura superficial verano ($^{\circ}$ C)	Min.	27.13	18.66
	Max.	38.18	34.31
	Media	34.04	26.76
	Desv. estándar	1.1	2.61

Fuente: elaboración propia.

Los rangos del muestreo obtenidos para estimar la presencia de vegetación según el valor del NDVI, mostraron un comportamiento estacional, bien notorio en la ciudad de Chillán. El valor mínimo de este índice en la ciudad de Antofagasta fue de 0.08 en invierno, aumentando a 0.11 en verano. En Chillán, la variación es similar, iniciando su valor en 0.19 en invierno, hasta alcanzar 0.21 en verano.

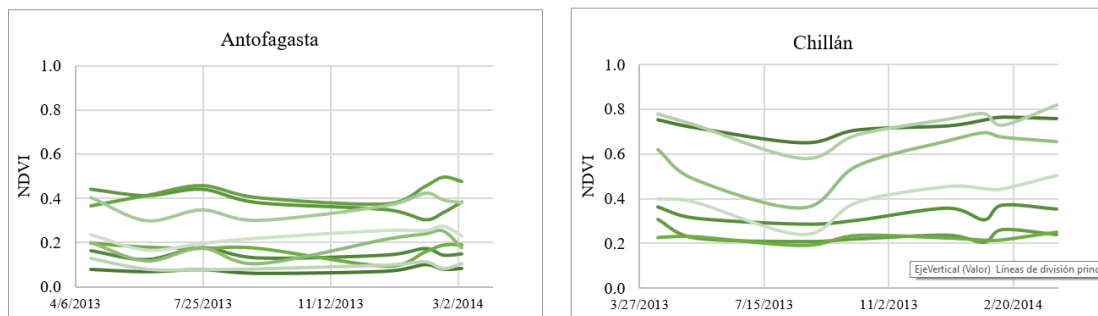
Tabla 8. Rangos muestreados del NDVI en sitios con destacada presencia de vegetación.

Ciudad	NDVI invierno		NDVI verano	
	Min.	Max.	Min.	Max.
Antofagasta	0.08	0.460	0.110	0.500
Chillán	0.190	0.651	0.205	0.821

Fuente: elaboración propia.

En la figura 4 se puede apreciar que los distintos tipos de vegetación muestreados en ambas ciudades, determinan intervalos continuos del índice vegetacional.

Figura 4. Ciclos fenológicos de la vegetación urbana muestreada en las ciudades de Antofagasta y Chillán (2013-2014).



Nota: Las curvas corresponden a los distintos puntos de muestreo de vegetación (ver figura 1). Fuente: elaboración propia.

En la figura se pueden ver, en distintos tonos de verde, los ciclos obtenidos a través de cada punto de muestreo seleccionado en ambas ciudades. De esta forma, se utilizaron los valores mínimos del NDVI (invierno-verano), para realizar la extracción de los píxeles representantes de la vegetación en ambas ciudades. Los resultados para el P_{veg} de ambas ciudades se resumen en la tabla 9.

El contraste de la superficie urbana cubierta con vegetación en ambas ciudades queda manifiesto. En el caso de Chillán, sin importar la estación del año, se puede encontrar más del 28% de su superficie cubierta con vegetación, mientras que en la ciudad de Antofagasta apenas se supera el 1%. Esto se refleja en los valores medios de P_{veg} , alejándose la media un poco más de un 1% del mínimo en Antofagasta, en comparación con el cerca de 34% en el que se sitúa el valor medio en Chillán.

Tabla 9. Estadísticos del porcentaje de superficie cubierta con vegetación en las ciudades de Antofagasta y Chillán. Periodo 2013-2014.

Ciudad		Antofagasta	Chillán
Sup. total manzanas (km ²)		50.78	44.61
Sup. total vegetación urbana (km ²)	Invierno	0.62	28.5
	Verano	1.02	32.41
Estadísticos	Min.	0	0
	Max.	100	100
	Media	1.28	34.11
	Desv. estándar	7.22	32.61

Fuente: elaboración propia.

En el caso de la amplitud térmica anual (A_t), el valor mínimo registrado en Antofagasta fue de 10.62^o C, mientras que el máximo fue de 23.14^o C. En contraste, en la ciudad de Chillán se registró un mínimo de amplitud térmica anual igual a 14.23^o, con un máximo de 24.96^o C. Ambos indicadores ambientales, fueron agrupados usando las relaciones espaciales definidas para las manzanas analizadas y sus vecindades. Mediante la reclasificación de las categorías resultantes del análisis geoestadístico, se procedió a sumar y jerarquizar los puntajes obtenidos de la normalización. Los resultados del índice local de Moran y el test estadístico de agrupamiento, aplicados a la A_t y al P_{veg} , se sintetizan en la tabla 10.

Tabla 10. Rangos estadísticos de la amplitud térmica anual (invierno 2013-verano 2014).

Ciudad	(° C)	Categoría de agrupamiento	Manzanas urbanas		Índice de Moran Local		Z-Score		P-valor	
			Nº de manzanas	% categoría	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Antofagasta	15.68 – 23.14	HH	1,202	30.06	0.01	4.71	1.96	160.14	0.00	0.05
	16.42 – 16.76	HL	4	0.10	-0.20	-0.16	-3.32	-2.85	0.00	0.01
	11.88 – 14.86	LH	17	0.40	-0.48	-0.09	-13.90	-2.29	0.00	0.02
	10.62 – 15.19	LL	1,339	33.49	0.05	1.81	1.96	37.91	0.00	0.05
	12.94 – 17.10	NS	1,436	35.92	-0.11	0.19	-1.87	1.95	0.05	1.00
	[10.62 – 23.14]	Total	3,998	100	[-0.48 – 4.71]		[-13.90 – 160.14]		[0.00 – 1.00]	
Chillán	21.03 – 24.96	HH	536	22.87	0.03	2.20	1.97	36.74	0.00	0.05
	21.34 – 22.75	HL	20	0.85	-0.15	-0.02	-7.29	-2.01	0.00	0.04
	17.09 – 20.47	LH	34	1.45	-0.31	-0.03	-11.06	-1.98	0.00	0.05
	14.23 – 20.50	LL	364	15.54	0.01	2.25	1.96	55.08	0.00	0.05
	17.96 – 23.01	NS	1,389	59.28	-0.12	0.13	-1.96	1.95	0.05	1.00
	[14.23 – 24.96]	Total	2,343	100	[-0.31 – 2.25]		[-11.06 – 55.08]		[0.00 – 1.00]	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 11. Rangos estadísticos del porcentaje de superficie cubierta con vegetación (invierno 2013-verano 2014).

Ciudad	Rangos	Categoría de agrupamiento	Nº de manzanas		Índice de Moran local		Z-Score		P-valor	
			Nº de manzanas	% categoría	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Antofagasta	49.41 – 100.00	HH	161	4.02	0.01	0.38	2.02	12.05	0.00	0.04
	70.10 – 100.00	HL	9	0.23	-0.14	-0.04	-3.17	-2.07	0.00	0.03
	0.04 – 14.75	LH	20	0.50	-0.20	-0.02	-5.39	-2.01	0.00	0.04
	0.01 – 7.09	LL	31	0.77	0.01	0.06	1.97	2.81	0.01	0.05
	0.00 – 100.00	NS	3,777	94.47	-0.11	0.12	-1.92	1.95	0.05	1.00
	[0.00 – 100.00]	Total	3,998	100	[-0.20 – 0.38]		[-5.39 – 12.05]		[0.00 – 1.00]	
Chillán	30.85 – 100.0	HH	442	18.86	0.01	2.99	1.96	27.14	0.00	0.05
	53.40 – 99.81	HL	70	2.98	-0.47	-0.01	-9.97	-1.96	0.00	0.05
	0.00 – 23.48	LH	17	0.72	-0.21	-0.02	-5.71	-1.96	0.00	0.05
	0.00 – 31.29	LL	632	26.97	0.06	0.59	1.97	10.36	0.00	0.05
	0.00 – 100.00	NS	1,182	50.45	-0.09	0.13	-1.95	1.94	0.05	1.00
	[0.00 – 100.00]	Total	2,343	100	[-0.47 – 2.99]		[-9.97 – 27.14]		[0.00 – 1.00]	

Fuente: elaboración propia.

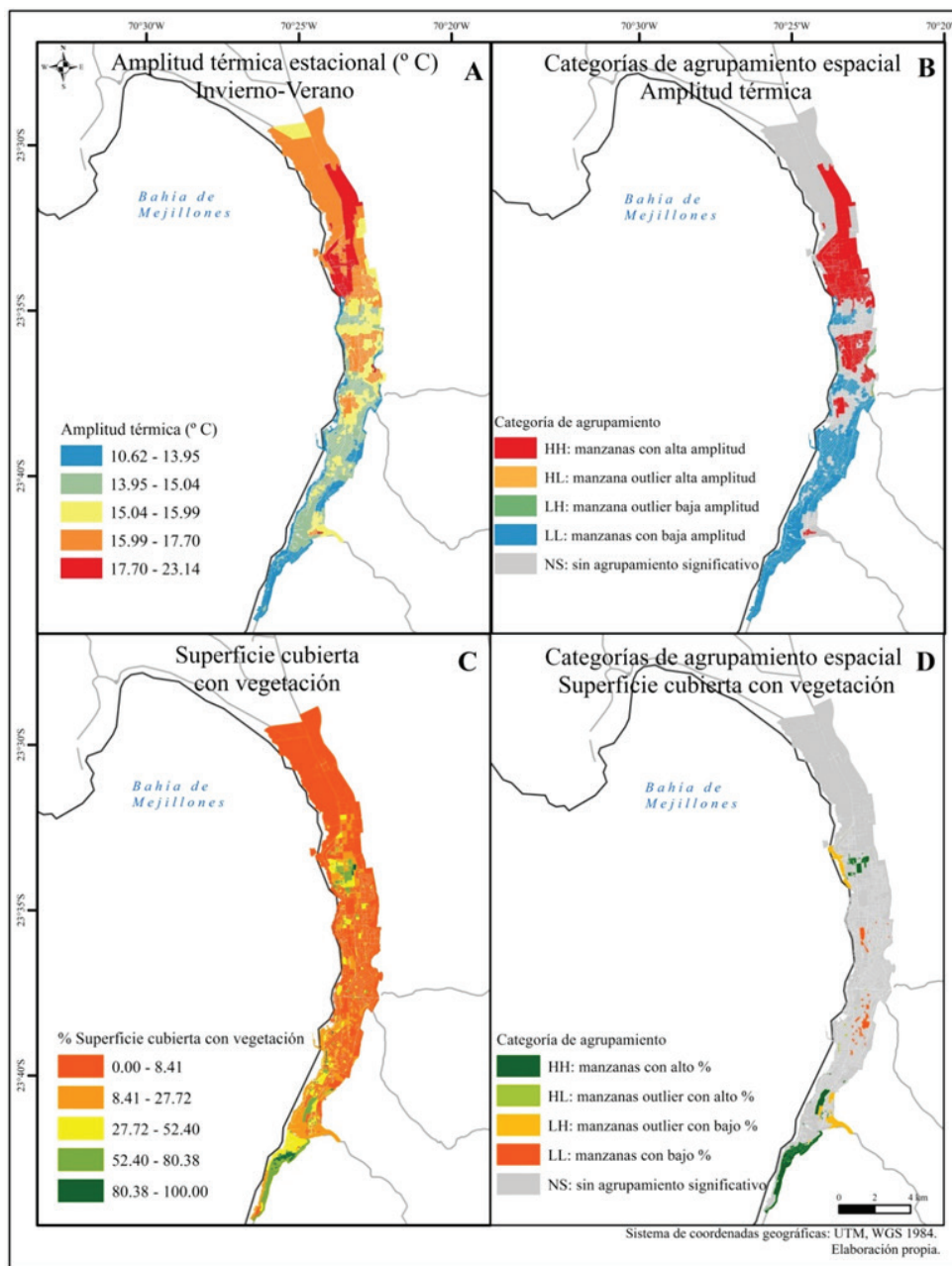
Se puede apreciar en las tablas 10 y 11 que los intervalos definidos por el análisis geoestadístico no son disjuntos, diferenciándose de los métodos tradicionales, como el método de quiebres naturales, y permitiendo reclasificar a las variables en relación a su magnitud y a la vecindad de las unidades espaciales. Además, el número de manzanas que componen cada categoría resultante, presenta distribuciones diferentes en ambas ciudades cuando se comparan por indicador ambiental. Chillán muestra, en el caso de la amplitud térmica anual, una mayor concentración de manzanas sin agrupamiento espacial significativo (59%), en comparación a Antofagasta. En cambio, para la vegetación, el porcentaje de manzanas sin agrupamiento espacial significativo es superior en Antofagasta (94%), en comparación con la ciudad de Chillán (50%).

La figura 5 presenta el comportamiento espacial de la A_t y el P_{veg} en la ciudad de Antofagasta. En ella se contrasta la representación espacial de los indicadores ambientales por dos métodos: el método basado en los quiebres naturales (minimización de la varianza intragrupal y maximización de la varianza intergrupala, definido un número arbitrario de clases) y el método de agrupamiento espacial basado en nociones de geoestadística.

Se aprecia que las zonas de baja amplitud térmica anual se concentran en el sur y en algunas zonas del centro de la ciudad, cercanas a la costa, mientras que los valores altos de A_t se vuelven más importantes al norte del centro urbano (figura 5A). Se generan claros *clusters* de alta amplitud en el centro y en el noreste de la ciudad, coincidentes con zonas de alta densidad de manzanas pobladas y las zonas industriales periféricas (figura 5B).

En términos del porcentaje de superficie cubierta con vegetación por manzana, la presencia de vegetación es pobre en la ciudad de Antofagasta, mostrando valores altos de porcentaje de vegetación (> 50%) en el sur de la ciudad (figura 5C). Esta escasez queda manifiesta en el agrupamiento del indicador ambiental, donde dos pobres aglomeraciones de altos valores (HH), resaltan en aquellos sectores con alto porcentaje de vegetación a lo largo del año (figura 5D).

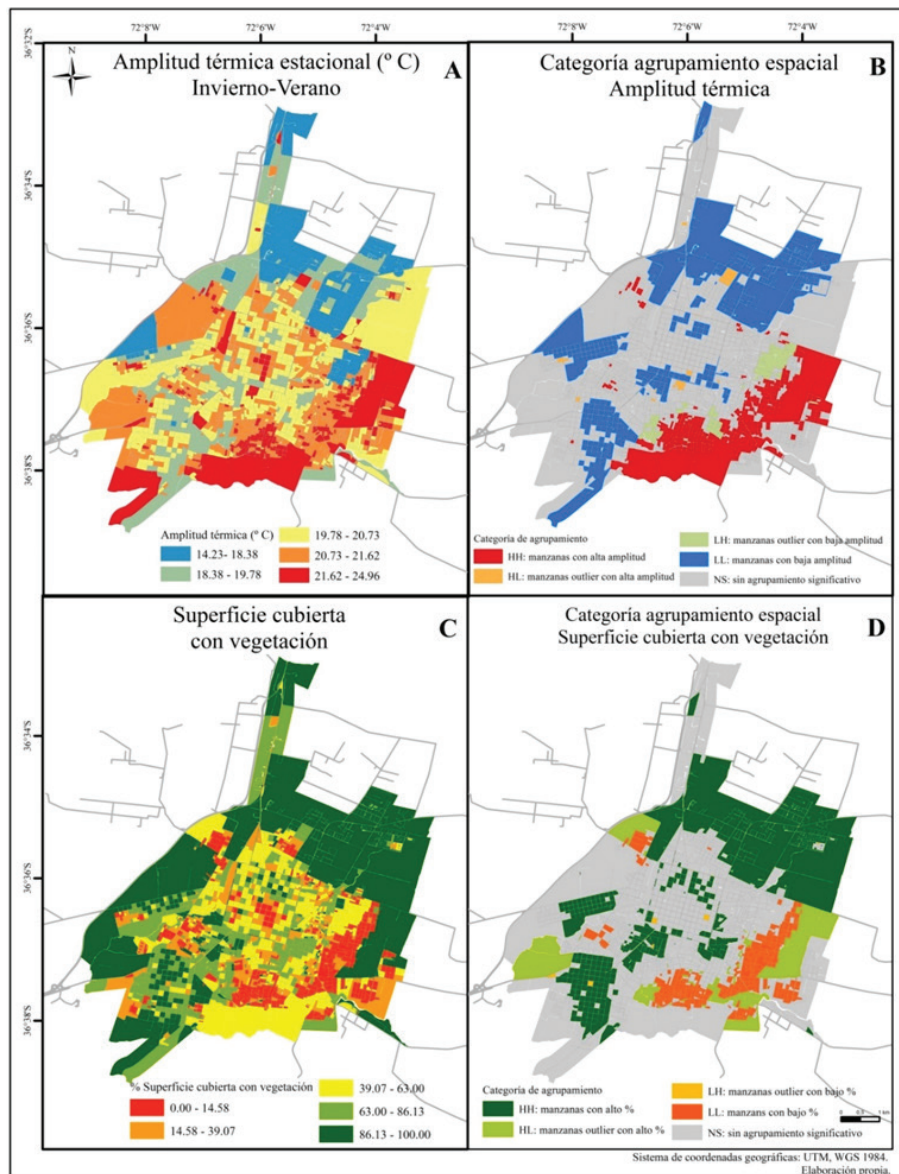
Figura 5. Variables ambientales y sus categorías de agrupación espacial: Antofagasta.



Fuente: elaboración propia.

En la figura 6 se pueden apreciar los resultados de A_t y P_{veg} obtenidos en la ciudad de Chillán: Se puede apreciar que las manzanas con alta amplitud térmica anual se distribuyen en la mayor parte de la ciudad, aunque presenta un patrón de concentración de manzanas con alta amplitud hacia el sureste (figura 6A). Las zonas con baja amplitud térmica se encuentran en el norte y al suroeste de la ciudad, aunque existen algunos sectores del centro con bajos valores (figura 6 A y B). Un patrón similar comparte P_{veg} , con la excepción de que el *cluster* central aparece desplazado hacia el oeste. Aunque cerca del 34% de la superficie de la ciudad se encuentra cubierta de vegetación a lo largo del año, esta presenta variaciones importantes en su distribución espacial, dejando en evidencia cierto déficit de vegetación en el interior de la ciudad (figura 6 D).

Figura 6. Variables ambientales y sus categorías de agrupación espacial: Chillán.

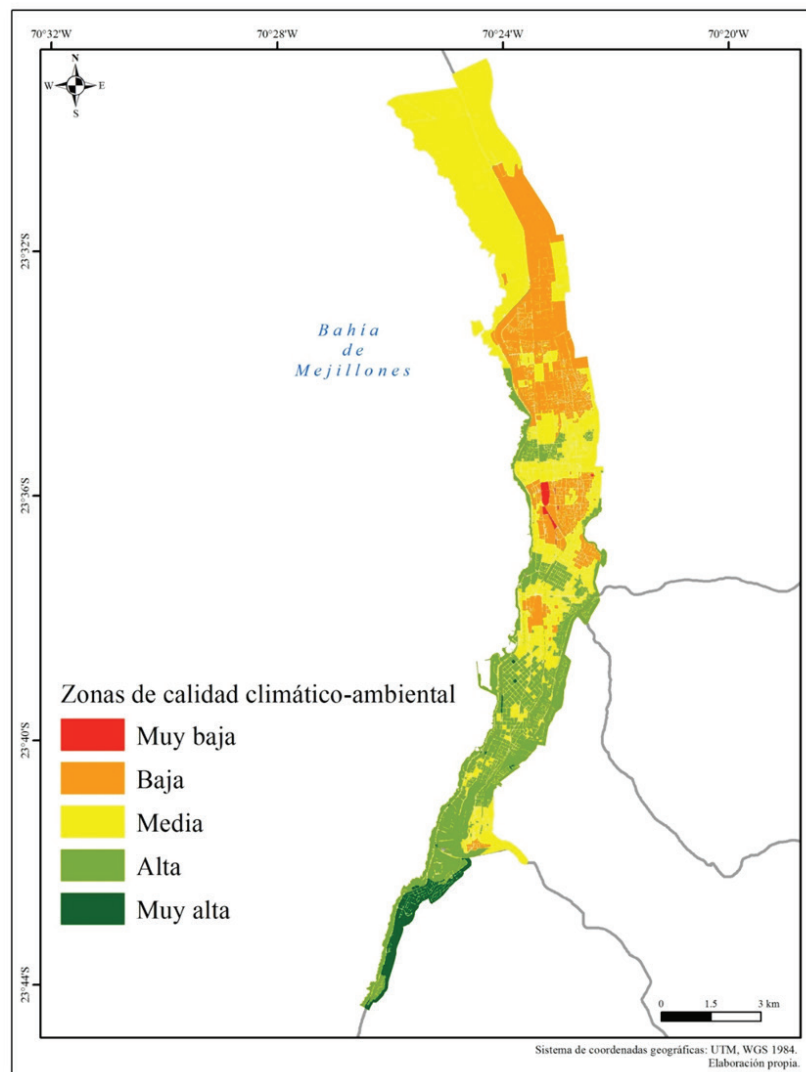


Fuente: elaboración propia.

Una vez categorizadas todas las manzanas urbanas de cada ciudad, se reclasificaron y jerarquizaron según su calidad climático-ambiental, obteniéndose las zonificaciones expuestas en las figuras 7 y 8.

Se puede observar en la figura 7 que las zonas con mejor calidad climático-ambiental en la ciudad de Antofagasta son las localizadas al centro y al sur, mientras que las zonas medias y bajas se localizan hacia el norte (sector La Chimba). Destacan las presencias de agrupaciones de manzanas con buena calidad climático-ambiental que irrumpen en las zonas deprimidas del norte. El foco de manzanas con muy baja calidad climático-ambiental se concentra en un barrio industrial rezagado en el centro de la ciudad (Ferrocarriles).

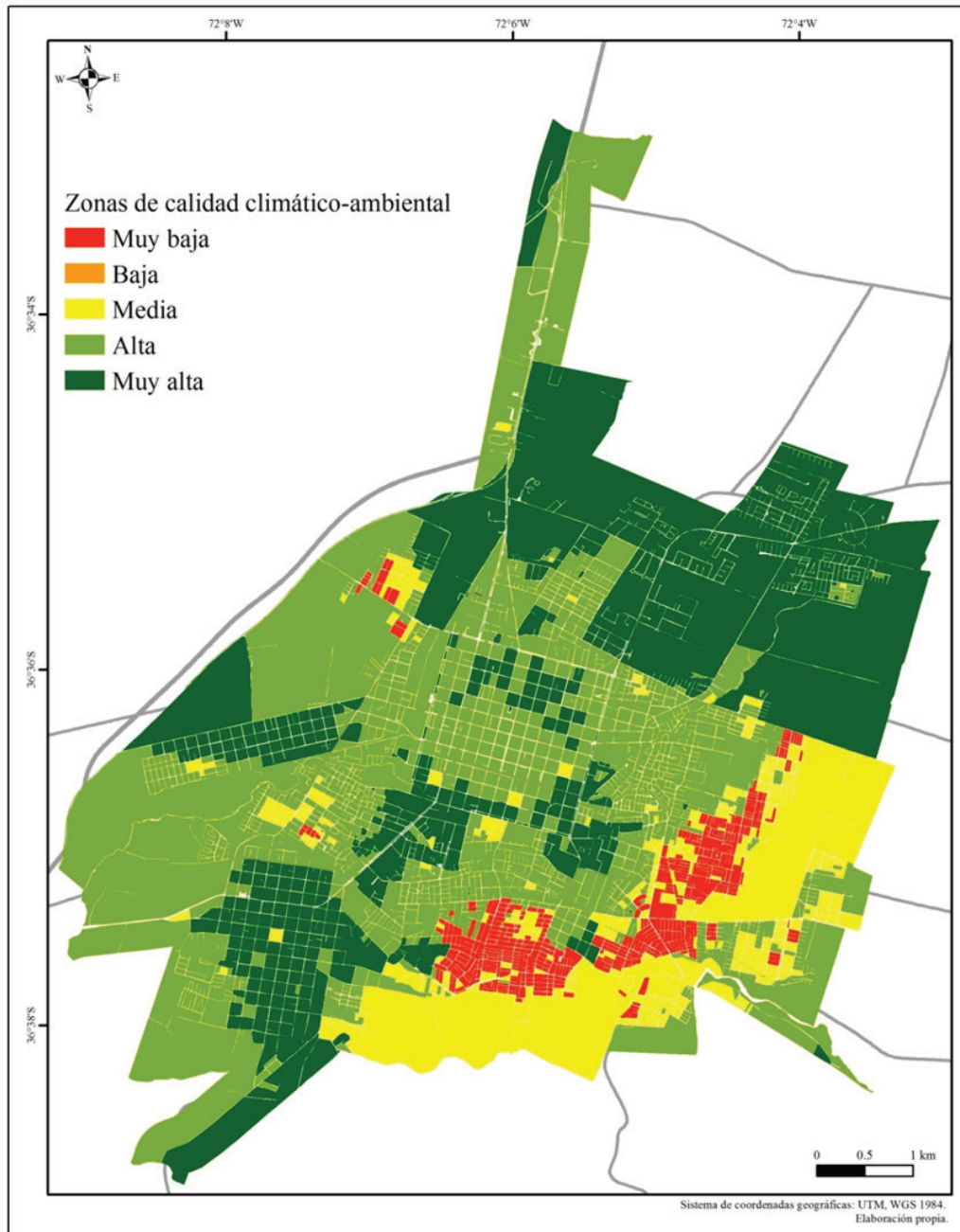
Figura 7. Zonas climático-ambientales de Antofagasta, periodo 2013-2014.



Fuente: elaboración propia.

En la figura 8 se aprecian las diferentes zonas de calidad climático-ambiental obtenidas para la ciudad de Chillán. Las zonas con muy mala calidad climático-ambiental forman un *cluster* en la parte sur este de la ciudad, coincidente con una alta densidad de manzanas urbanas. La misma tipología se presenta en un conjunto de manzanas localizadas al noroeste de la ciudad. No obstante, la mayoría de las manzanas urbanas tiene calidades climático-ambientales Alta o Muy alta, aunque las categorías se encuentran fuertemente influenciadas por la actividad agrícola de la periferia.

Figura 8. Zonas climático-ambientales de Chillán, periodo 2013-2014.



Fuente: elaboración propia.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En términos de resultados obtenidos por teledetección satelital, las principales diferencias entre los valores de TST y NDVI estimadas en las ciudades de Antofagasta y Chillán, se relacionan con el contexto climático-geográfico en el cual ambas ciudades se localizan (desierto costero y clima templado interior, respectivamente), con su morfología y con el uso del suelo predominante.

En Antofagasta se aprecia que el rango o largo de los intervalos observados de la amplitud térmica anual es mayor con respecto a Chillán; aunque en términos intraurbanos, es más intensa en el sector norte y céntrico de la ciudad, en comparación con el sector sur, que a su vez es el sector con mayor concentración de población de alto ingreso. En contraste, en la ciudad de Chillán los mayores valores de la amplitud térmica se encuentran en los sectores de mayor densidad urbana, que coinciden con sectores de peores condiciones socioeconómicas de acuerdo a estudios existentes (Henríquez, 2014). Destaca el sector de Chillán Viejo (sector sur) con bajas temperaturas, relacionado con un alto porcentaje de vegetación al interior de las manzanas urbanas. En este sector se emplaza una estructura urbana particular, denominada casa-huerto familiar, la cual posee niveles de calidad climático-ambientales superiores al resto de los barrios de la ciudad (Henríquez, 2005).

Los resultados obtenidos se pueden aplicar a estudios de confort térmico en ambientes exteriores, los que están recibiendo una creciente atención como estrategias de mitigación de los efectos inadvertidos del clima urbano y del cambio climático. Las características térmicas de las superficies, junto con estrategias bioclimáticas y de diseño urbano, pueden influir sustantivamente en el enfriamiento del microclima urbano por medio del uso de materiales “fríos”, aumento de espacios verdes, presencia de agua, control solar y sumideros de calor. Por ejemplo, este trabajo permite priorizar las estrategias de ubicación o aumento de vegetación pública y privada en ciertas manzanas de la ciudad, como la zona céntrica y sector La Chimba en Antofagasta, o la población Los Volcanes, Río Viejo o Santa Teresa en Chillán.

La inclusión de estas medidas puede reducir las temperaturas del aire y de la superficie durante el verano, mejorando las condiciones ambientales y la calidad de vida. Del mismo modo, el uso de materiales y colores que presentan alta reflectividad a la radiación solar y alta emisividad espectral, contribuyen a aumentar el albedo urbano y se consideran como una de las técnicas más prometedoras y potentes para mitigar el fenómeno de isla de calor urbano. Muchos de estos elementos son posibles de incorporar en la planificación urbana, especialmente frente a los desafíos que impone el cambio climático.

Por otro lado, la cantidad de metros cuadrados de áreas verdes por habitantes es un importante indicador de bienestar y salud de la población urbana, el cual ha sido propuesto por organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud y es usado ampliamente en la gestión ambiental local. En este sentido el método aporta una visión diferente ya que demuestra no sólo la

importancia de las áreas verdes públicas, sino también los aportes de la vegetación de los espacios privados en la determinación de la calidad climático-ambiental urbana.

Desde un punto de vista metodológico, se puede concluir que la compilación de diversos algoritmos y la posible automatización de los procesos involucrados en la obtención de la TST y el NDVI en una sola plataforma SIG, como es el caso de ArcGIS, es de gran utilidad para el procesamiento rápido y preciso de las variables e indicadores estudiados, los cuales mediante un proceso geoes-tadístico posterior, permiten obtener un índice sintético de calidad climático-ambiental urbana. Asimismo, los resultados obtenidos pueden ser de gran relevancia para la planificación y gestión ambiental de ciudades que disponen de poca información ambiental. A su vez, el uso de métodos geoes-tadísticos ha resultado conveniente para realizar la reclasificación espacial de los indicadores ambientales y en la obtención de zonas de calidad climático-ambiental.

Como principales fortalezas de este método, es que permite la localización de aquellas manzanas, sectores o zonas de una ciudad que presenten un déficit de algunas condiciones climático-ambien-tales básicas. Permite definir estrategias para la localización de ciertos usos de suelo y encontrar aquellos lugares de la ciudad con pobre acceso a áreas verdes de calidad. Además, permite cuan-tificar diferencias en el comportamiento térmico y de la cobertura vegetal al interior de la ciudad, explicitando patrones y distribuciones espaciales de ambos indicadores.

Dentro de las principales limitantes de la metodología propuesta se puede mencionar que se re- quiere de personal capacitado para aplicar el método en otras ciudades, especialmente en lo que se refiere al manejo de imágenes satelitales y conceptos geoes-tadísticos, aunque el grado de ma- nejo conceptual no es elevado para operar la interfaz gráfica de los modelos resultantes. En forma complementaria y como desafío futuro, se puede avanzar en la determinación de una expresión matemática que relacione el aumento de la masa vegetal y la disminución de temperatura del suelo y del aire, así como incluir nuevas variables ambientales en el índice.

Finalmente, se recomienda seguir profundizando y relacionando esta información ambiental con otras variables asociadas a diversos aspectos urbanos, tales como las condiciones socioeconómicas de la población, la emisión de contaminantes, la distribución de enfermedades, entre otras, que den cuenta de los avances en la calidad climático-ambiental y en la sustentabilidad urbana, en diversas escalas espaciales.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento del proyecto FONDECYT N° 1130305 “Estudio y modelación del clima urbano a escala local, como base para la proposición de lineamientos de adaptación frente al cambio climático en una red de ciudades chilenas” y el apoyo de los Centros CEDEUS Conicyt/Fondap Programa 15110020 y CIGIDEN Conicyt/Fondap Programa 15110017.

REFERENCIAS

- Abkari, H., & Konopacki, S. (2005). Calculating energy – saving potentials of heat – island reduction strategies. *Energy Policy*, 33, 721-756.
- Anselin, L. (1995). Local Indicators of Spatial Association—LISA. *Geographical Analysis*, 27 (2): 93–115.
- Bowler, D., Buyung-Ali, L., Knight, T., & Pullin, A. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97 (3), 147-155.
- Carlson, T., & Ripley, D. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62 (3), 241-252.
- Carvacho, L. (2011). Puntajes para unidades valorativas. *Anales de la Sociedad Chilena de Ciencias Geográficas*, 448-455.
- CEPAL (2009). *La economía del cambio climático en Chile. Síntesis*. Santiago de Chile: CEPAL.
- Colby, J. D. (1991). Topographic normalization in rugged terrain. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57 (5): 531-537.
- CORFO (2013). *Geografía económica de Chile*. Santiago, Cámara Chilena de la Construcción. Pontificia Universidad Católica de Chile, Dirección de Bibliotecas Archivos y Museos.
- Correa, E. N., Flores, L. S., & Lesino, G. (2003). Isla de calor urbana: efecto de los pavimentos. Informe de avance. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 7 (2): 11.25-11.30.
- Escobar, L. (2006). Indicadores sintéticos de calidad ambiental: un modelo general para grandes zonas urbanas. *Revista EURE*, 32 (96), 73-98.
- Freeman III, M. A. (1993). *The measurement of environmental and resource values: Theory and methods*. Washington, D.C.: Resources for the future.
- Gill, S., Handley, J., Ennos, R., & Pauleit, S. (2007). Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure. *Built Environment*, 3 (1), 115-133.
- Heisler G.M., Grant, R., Grimmond, S., & Souch, C. (1995). Urban forests cooling our communities? En C. Kolin & M. Barratt (Eds.) *Proc. 7th National Urban Forest Conference* (pp. 31-34).
- Henríquez, C. (2005). El rol de la casa-huerto familiar en la sustentabilidad urbana. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, 9 (194), 70. Recuperado de <http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-194-70.htm>
- Henríquez, C. (2014). *Modelando el crecimiento de ciudades medias. Hacia un desarrollo urbano sustentable*. Santiago de Chile: Ediciones UC.
- INE (2004). *Chile: Estimaciones y Proyecciones de Población por Sexo y Edad. País Urbano-Rural 1990-2020*. Santiago: Instituto Nacional de Estadísticas.

- INE (2008). *División Geográfica Censal*. Santiago: Instituto Nacional de Estadísticas.
- INE (2013). *Pre Censo 2011 de Población y Vivienda. Coberturas geográficas*. Santiago: Instituto Nacional de Estadísticas.
- IPCC (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., et al. (eds.)]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Jiménez-Muñoz, J., Cristóbal, J., Sobrino, J., & Skokovic, D. (2014). Land Surface Temperature Retrieval Methods from Landsat-8 Thermal Infrared Sensor Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(41), 1840-1843.
- Jiménez-Muñoz, J., & Sobrino, J. (2003). A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research*, 108 (D22).
- Mardones, M., Echeverría, F., & Jara, C. (2005). Una contribución al estudio de los desastres naturales en Chile Centro Sur: efectos ambientales de las precipitaciones del 26 de junio del 2005 en el área Metropolitana de Concepción. *Investigaciones Geográficas* 38, 1-25.
- Mitchell, A. (2005). *The ESRI Guide to GIS Analysis* (vol. 2) Redlands, California: ESRI Press.
- Myneni, R., Hall, F., Sellers, P., & Marshak, A. (1995). The interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33 (2), 481-486.
- Nichol, J., & Wong, M. (2005). Modelling urban environmental quality in a tropical city. *Landscape and Urban Planning*, 73, 49-58.
- Oke, T. (1987). *Boundary Layer Climates* (2da ed.). Routledge.
- Oke, T. R. (1998). The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. *International Journal of Remote Sensing*, 19 (11), 2085 – 2104.
- Parra, J., Sobrino, J., Morales, L., Castellaro, G., Uribe, J., & Gaete, N. (2006). Aplicación de un Algoritmo de Split-Window para la Estimación de la Temperatura de la Superficie Terrestre desde Datos AVHRR-NOAA. *Agricultura Técnica*, 66 (4), 385-392.
- Potcher, O., Cohen, P., & Bitan, A. (2006). Climatic behavior of various urban parks during hot and humid summer in the Mediterranean city of Tel Aviv, Israel International. *Journal of Climatology*, 26, 1695-1711.
- Romero, H., Molina, M., Moscoso, C., Sarricolea, P., & Smith, P. (2007). Caracterización de los cambios de usos y coberturas de suelo causados por la expansión urbana de Santiago, análisis de sus factores explicativos e inferencias ambientales. En C. Mattos & R. Hidalgo (eds.), *Movilidad espacial y reconfiguración Metropolitana* (pp. 251-269). Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., Woodcock, C.E., Allen, R. G., Anderson, M., ...Zhu, Z. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145, 154-172.
- Santana, L., Escobar, L., & Capote, P. (2010). Estimación de un índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite. *Revista de Geografía Norte Grande*, 45, 77-95.
- SINIM (2015). *Sistema Nacional de Información Municipal*. Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administra-

- tivo. Recuperado de http://www.sinim.gov.cl/informacion_municipal.php
- Sobrino, J., & Raissouni, N. (2000). Toward remote sensing methods for land cover dynamics monitoring: Application to Morocco. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 353-366.
- Teillet, P.M., Guindon, B., & Goodenough, D. (1982). On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 8 (2): 1537-1540.
- United Nations (2014). *World urbanization prospects: The 2014 revision. Highlights*. New York: UN, Department of Economic Social Affairs. Population Division.
- Van De Griend, A., & Owe, M. (1993). On the relationship between thermal emissivity and the normalized different vegetation index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, 14: 1119-1131.
- Whitford, V., Ennos, A., & Handley, J. (2001). 'City form and natural process' - indicators for the ecological performance of urban areas and their application to Meryside, UK. *Landscape and Urban Planning*, 57, 91-103.

EVALUACIÓN MULTI PELIGRO DE LAS INSTALACIONES CRÍTICAS EN LA CIUDAD DE MEXICALI

Judith Ley García*

INTRODUCCIÓN

La evaluación de peligros múltiples o multi-peligro ha sido un tema relativamente reciente a nivel internacional y, en particular, una sugerencia de Naciones Unidas a los países del mundo, para el logro del manejo integral del riesgo de desastre. Después de la proclamación de los años noventa como el Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales (DIRDN), donde se planteó mitigar los efectos de los desastres, especialmente en los países en desarrollo (Molin, 1999), en la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sustentable en Johannesburgo (Naciones Unidas, 2002) y en la Conferencia Mundial en Kobe (Naciones Unidas, 2005), Naciones Unidas sugiere llevar a cabo una aproximación holística en la reducción del riesgo de desastre que incorpore la práctica de la evaluación integral de peligros o amenazas múltiples en la elaboración de políticas, planes y programas relacionados con el desarrollo sustentable y la protección civil en todos los niveles y escalas, especialmente en la urbana.

En las ciudades se concentra gran parte de la población mundial y de las actividades productivas, por ello las pérdidas y daños tienden a magnificarse, cuando en ellas se presentan eventos naturales o antropogénicos intensos. Consecuentemente, desde el DIRDN, las ciudades han sido un objetivo importante en materia de prevención de catástrofes, cuyo primer paso consiste en la identificación y zonificación del paisaje de amenazas urbanas para poder establecer medidas específicas que permitan disminuir la vulnerabilidad y mitigar el riesgo de desastre. Surge así la necesidad de la evaluación multi-peligro como una herramienta básica de la gestión de riesgos urbanos que, entre otras cosas, permite registrar la acción combinada de distintos peligros en el territorio,

* Instituto de Investigaciones Sociales, Universidad Autónoma de Baja California, jley@uabc.edu.mx

predecir posibles efectos en cadena y modelar escenarios de desastre.

Si bien, en el espacio urbano se encuentran distribuidos comercios, servicios, industrias, viviendas, población, redes, infraestructuras, equipamientos y otras inversiones públicas y privadas, que permiten el crecimiento económico y el desarrollo de la vida en el lugar, también existen elementos construidos que resultan prioritarios en materia de protección civil, como es el caso de las instalaciones críticas, también conocidas como infraestructuras críticas e incluye los servicios vitales y de emergencia.

La protección de instalaciones básicas para el desarrollo local y regional data de tiempos remotos, sin embargo, en la actualidad, la amenaza que representan los ataques terroristas ha incrementado la preocupación internacional en el tema. En particular, después del ataque terrorista que recibió Estados Unidos en 2001 se generaron propuestas concretas en materia de seguridad y defensa de ciertas instalaciones a nivel mundial. Tal es el caso de la Estrategia Nacional para la Protección Física de Infraestructuras Críticas y Activos Clave de Estados Unidos, enfocada a identificar y priorizar activos esenciales para el bienestar económico y social del país (Office of the president, 2003; Moteff & Parfomak, 2004) y el Programa Europeo de Protección a Infraestructura Crítica (elaborado en 2005) que ha derivado en la creación de sistemas de protección colaborativos, donde participan diversos países y organismos, con la tarea inicial de identificar y designar las infraestructuras destinadas a protección (Unión Europea, 2010), pero ¿qué son estas instalaciones?

En el contexto europeo, la legislación española se refiere a las infraestructuras críticas como aquellas infraestructuras estratégicas (instalaciones, redes, sistemas y equipos físicos y de tecnología de la información) “cuyo funcionamiento es indispensable y no permite soluciones alternativas, por lo que su perturbación o destrucción tendría un grave impacto sobre los servicios esenciales.” Entendiendo que un servicio esencial es aquel “necesario para el mantenimiento de las funciones sociales básicas, la salud, la seguridad, el bienestar social y económico de los ciudadanos, o el eficaz funcionamiento de las Instituciones del Estado y las Administraciones Públicas.” (Gobierno de España, 2011, p.43372). En este sentido, el primer reto para los países europeos es lograr el consenso de aquello que es crítico o esencial para poder elaborar una lista de las instalaciones que ameritan ser protegidas y derivar estrategias de protección.

En América Latina, la Organización de los Estados Americanos (OEA, 1993, cap. 7, p.4), como una contribución al DIRDN, abordó el tema de las instalaciones críticas, definiéndolas como:

todas aquellas estructuras u otras mejoras hechas por el ser humano que por razón de su función, tamaño, áreas de servicio o singularidad, tienen el potencial de causar daño corporal, extensos daños a la propiedad, o perturbar las actividades socioeconómicas vitales si son destruidas, dañadas o si sus servicios son repetidamente interrumpidos.

De esta manera, para la OEA (1993), las instalaciones críticas abarcan tanto estructuras singulares o grandes cuya inhabilitación podría ser catastrófica, instalaciones de emergencia cuyo funcionamiento es crucial inmediatamente antes, durante y después de un desastre, estructuras con alta densidad de ocupación cuya falla podría producir numerosas muertes y lesiones, así como instalaciones necesarias para la seguridad pública (tabla 1).

Tabla 1. Instalaciones críticas.

Sistema	Tipo de instalación
Seguridad pública y defensa (SPD)	1) Instalaciones de defensa civil
	2) Centros de comunicación
	3) Centros de manejo de emergencia
	4) Estaciones de bomberos
	5) Hospitales y otras instalaciones médicas
	6) Refugios de emergencia para la población
	7) Estaciones de policía y otras para la seguridad pública
Ocupación de alta densidad (AD)	1) Auditorios, teatros, estadios
	2) Iglesias
	3) Centros educacionales
	4) Hoteles
	5) Edificios de oficinas
	6) Instituciones penales
Transporte (TR)	1) Vías aéreas (aeropuertos, helipuertos)
	2) Carreteras (vías, puentes, túneles, pasos a desnivel)
	3) Ferrocarril (vías, túneles, caminos, patios, depósitos)
	4) Vías de agua (canales, esclusas, puertos, diques, muelles)
Instalaciones (redes de infraestructura) (II)	1) Comunicaciones
	2) Energía eléctrica
	3) Instalaciones petroquímicas
	4) Agua potable
	5) Aguas servidas
Instalaciones industriales (IN)	1) Materiales corrosivos
	2) Materiales explosivos
	3) Materiales inflamables
	4) Materiales radioactivos
	5) Materiales tóxicos
	6) Varios materiales peligrosos
Agrícola (AG)	1) Alimentos
	2) Sistemas de riego
	3) Almacenamiento de agua

Fuente: OEA (1993).

Desde los años noventa, la propuesta de la OEA en materia de evaluación de las instalaciones críticas va dirigida a los países en desarrollo, cuya preocupación no se centra en la amenaza terrorista y cibernética, sino en el impacto que los fenómenos naturales tienen en las comunidades y donde, el daño a estas instalaciones durante una emergencia puede magnificar el desastre. Sin embargo, a veinte años del DIRDN, son escasos los países latinoamericanos que han integrado la protección de instalaciones críticas como una prioridad nacional y, en México, aunque se ha avanzado en el diagnóstico de los peligros en diferentes escalas (mediante la elaboración de atlas de riesgos de cobertura nacional, estatal, municipal y urbana), aún no existe una estrategia nacional sobre las instalaciones críticas, menos aún iniciativas urbanas en la materia, particularmente en las ciudades donde ocurren fenómenos naturales y tecno industriales extremos.

En este sentido, a manera de un primer acercamiento a la evaluación de la seguridad de las instalaciones críticas urbanas, el presente trabajo presenta los resultados de la valoración del nivel de exposición que presentan las instalaciones críticas de Mexicali, Baja California; ciudad ubicada en la frontera norte de México (figura 1) y expuesta permanentemente a múltiples peligros, algunos de ellos sumamente intensos o extremos.

Figura 1. Localización de la ciudad de Mexicali.



Fuente: tomado de Ley, Denegri y Ortega (2015).

MÉTODO

Para la evaluación del nivel de exposición a peligros de las instalaciones críticas urbanas se construyó un sistema de información geográfica en Mapinfo Professional 10.0 que integró capas de información sobre la distribución espacial de los peligros y de las instalaciones críticas en la mancha urbana¹, para ello, se siguieron las siguientes fases:

1. La identificación y zonificación de los peligros geológicos, hidrometeorológicos, químico-tecnológicos, sanitarios y socio-organizativos que inciden en la ciudad, a partir de la cartografía digital del atlas municipal de riesgos (UABC, AM, & Sedesol, 2011) y del Laboratorio de Geomática, junto con una ortofoto digital de alta resolución.
2. El inventario de las instalaciones críticas señalado por la OEA (1993), a partir del Diccionario Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) del INEGI (2009), de la cartografía digital del atlas municipal de riesgos (UABC, AM, & Sedesol, 2011) y del Laboratorio de Geomática, así como la verificación de su localización mediante una ortofoto digital de alta resolución.
3. Para la cuantificación del nivel de exposición de las instalaciones críticas se llevó a cabo la superposición de ambos temas (peligros e instalaciones) y se calculó la peligrosidad agregada (PA) para cada instalación a partir de la siguiente fórmula: $PA = \sum Pi.Np$ donde: Pi es el grado de peligrosidad individual para cada tipo de peligro y Np el número de peligros coincidentes en el territorio (Perles & Cantarero, 2010).

RESULTADOS

EL MOSAICO DE PELIGROS EN MEXICALI

Los peligros que tienen presencia en la ciudad de Mexicali son de diversos tipos, el Centro Nacional para la Prevención de Desastres (Cenapred, 2001) sugiere la evaluación de los siguientes: geológicos, hidrometeorológicos, químico-tecnológicos, sanitarios y socio-organizativos. Estos peligros se manifiestan de manera distinta en el espacio urbano de tal forma que las instalaciones críticas, según su localización, están expuestas a un mosaico distinto de amenazas naturales y antropogénicas.

Los peligros geológicos

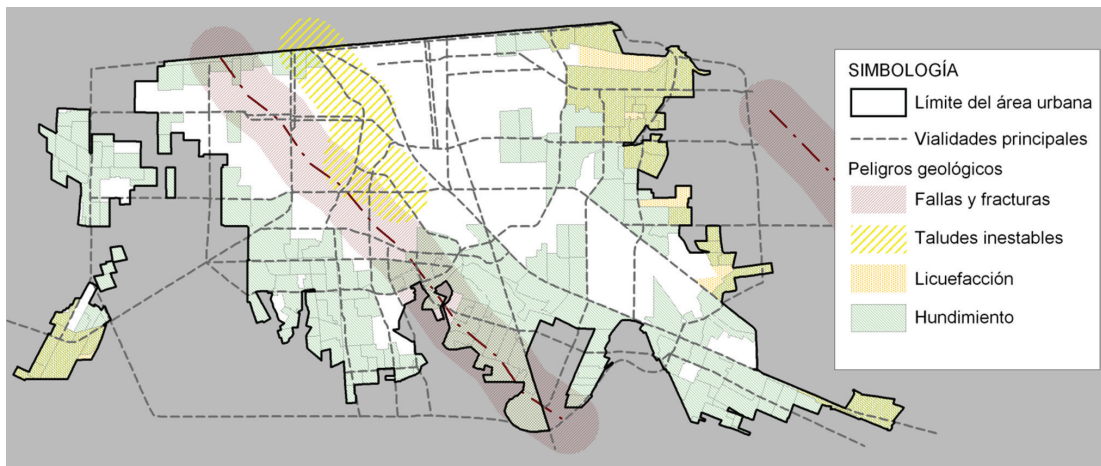
Los peligros geológicos comprenden a una amplia gama de fenómenos originados por acciones y movimientos de la corteza terrestre, entre ellos se encuentran: fallas y fracturas, sismos, inestabi-

¹ En este ejercicio se tomó como límite de la mancha urbana el área cubierta por las Áreas de Gestión Estadística Básica (AGEB) del INEGI (2010) para las localidades de Mexicali, Santa Isabel, Progreso, Puebla y Cuernavaca.

lidad de laderas, erupciones volcánicas y tsunamis (Segob, 2012), así como otras amenazas geotécnicas (licuefacción, subsidencia o hundimiento).

Con respecto a estos peligros, la ciudad de Mexicali se encuentra asentada en medio de un entramado de fallas geológicas, justo en la zona de más alta sismicidad en México, por ende los sismos amenazan permanentemente todo el espacio urbano. Las fallas geológicas más cercanas son: la Imperial, al oriente de la mancha urbana a una distancia aproximada de 2 km, y la falla Michoacán de Ocampo (inferida por Lira, 2005) que cruza en diagonal la ciudad por la parte poniente (figura 2), amenazando a las instalaciones que se encuentran más próximas a ellas.

Figura 2. Zonificación de los peligros geológicos en la ciudad de Mexicali.



Fuente: elaboración propia con base en UABC, AM y Sedesol (2011).

A pesar de que la ciudad se asienta en terreno plano, la inestabilidad de laderas se originó cuando se llevaron a cabo obras de urbanización que generaron cortes abruptos en el antiguo cauce del Río Nuevo formando taludes inestables. La licuefacción se presenta principalmente en suelos saturados, de tal forma que la cercanía a cuerpos de agua e infraestructura de riego, junto con la proximidad a fallas geológicas, hace más intenso este peligro en la periferia urbana. Mientras que los hundimientos, aunque leves, ocurren principalmente en las zonas aledañas a canales y drenes agrícolas atrapados por el crecimiento urbano.

El volcán Cerro Prieto, de tipo domo y localizado a 20 km al sur de la ciudad, es considerado por Cenapred (2006, p.128) como “improbable de que represente un nivel significativo de peligro”. Así, en esta evaluación, se consideró un nivel de peligro nulo en este rubro. Por su parte, la distancia de más de 80 km entre la ciudad y la línea de la costa del Golfo de California, hace irrelevante la exposición urbana a tsunamis o maremotos (UABC, AM, & Sedesol, 2011).

Los peligros hidrometeorológicos

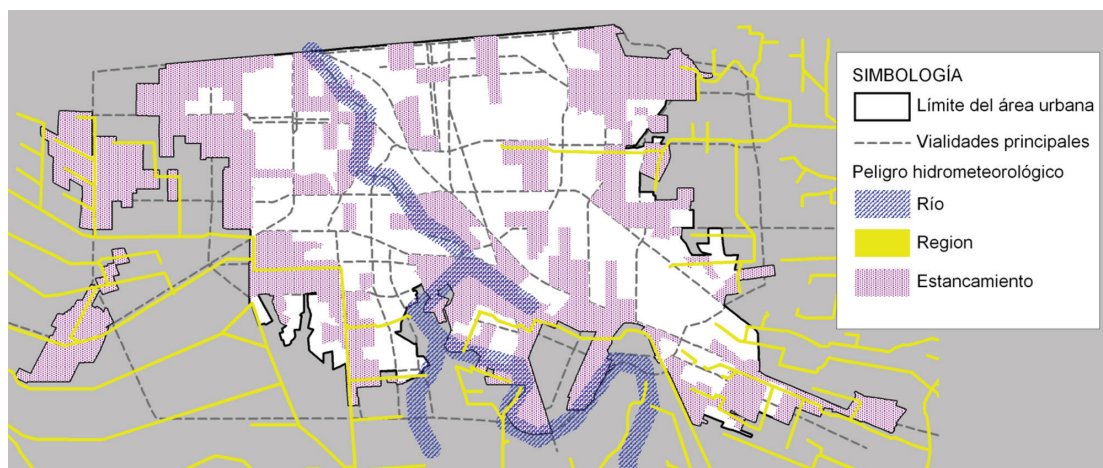
Los peligros hidrometeorológicos se originan por la acción de los agentes atmosféricos tales como ciclones tropicales, lluvias extremas, inundaciones, granizadas, nevadas, heladas, temperaturas extremas (ondas cálidas y gélidas), vientos fuertes y sequías (Segob, 2012).

El estado de Baja California tiene un nivel medio de peligrosidad por ciclones y huracanes, sin embargo, estos peligros difícilmente tienen incidencia directa en la ciudad de Mexicali, excepto por la eventual presencia de lluvias intensas derivadas de estos meteoros. Cabe aclarar que, aunque la precipitación pluvial es muy baja, según Rodríguez (2002), sólo bastan 10 mm para que existan problemas de inundación en la ciudad. Esto sucede como producto del encharcamiento de agua que propicia lo plano del terreno, así como la falta de pavimentación y de drenaje pluvial en algunas zonas.

Además de lo anterior, la proximidad a cuerpos de agua e infraestructura hidráulica conlleva a inundaciones una vez que éstos se saturan por la presencia combinada de vegetación, basura y lluvias intensas. Por consiguiente las inundaciones son más frecuentes en los cauces antiguos y actuales del Río Nuevo, así como en los alrededores de los canales y drenes, además de las zonas propicias al estancamiento de agua de lluvia (figura 3).

Por su parte, las temperaturas extremas se presentan con grandes contrastes térmicos tanto diarios como estacionales en la ciudad, con temperaturas muy altas en verano (máximas promedio de 40° C y máximas absolutas mayores a 50° C) y bajas en invierno (mínimas promedio de 5° C y mínimas absolutas menores a -5° C), por lo tanto se considera una peligrosidad urbana alta por frío y muy alta por calor extremo (UABC, AM, & Sedesol, 2011).

Figura 3. Zonificación de los peligros hidrometeorológicos en la ciudad de Mexicali.



Fuente: elaboración propia con base en UABC, AM y Sedesol (2011).

De acuerdo con Cenapred (2001), en Mexicali existe un peligro moderado por vientos y, aunque rara vez alcanzan los 20 km/h, eventualmente pueden llegar a ser fuertes y provocar tolvaneras, caídas o desgajamientos de árboles, desprendimientos de anuncios y daño de estructuras ligeras.

Los principales hidrometeoros, originados por los sistemas frontales en el estado de Baja California, son las heladas, nevadas y granizadas, pero éstos no representan un peligro en la ciudad de Mexicali. No obstante, eventualmente se presentan granizadas a finales del invierno, en el verano y hasta mediados de otoño (García-Cueto, 1988), también se han presentado heladas durante el invierno aunque este fenómeno ha disminuido debido a que la urbanización ha modificado las condiciones térmicas locales creando una isla de calor urbano (García-Cueto, 2006), por esta razón estos peligros no se incluyeron en la evaluación.

A pesar de estar localizada en una región semiárida, la ciudad no se ve afectada por el peligro de sequía, esto sucede porque la principal fuente de abastecimiento de agua es el Río Colorado, por donde se recibe una cuota establecida en el Tratado de Aguas² firmado por Estados Unidos de América y México en 1944, garantizando la disponibilidad de agua durante todo el año.

Los peligros químico-tecnológicos

Los peligros químicos o químico-tecnológicos se generan por la acción violenta de diferentes sustancias derivadas de su interacción molecular o nuclear, comprende fenómenos destructivos tales como incendios, explosiones, fugas de sustancias, derrames y radiaciones (Segob, 2012) que ocurren tanto en instalaciones fijas como durante el transporte de materiales peligrosos (corrosivos, reactivos, explosivos, tóxicos e inflamables).

El inventario de instalaciones peligrosas en la ciudad de Mexicali reporta 40 industrias de alto riesgo, así como 142 estaciones de servicio y 45 estaciones de carburación distribuidas en toda la mancha urbana (ver figura 4) que implican el manejo de materiales y residuos tóxicos³ e inflamables⁴ (en estado líquido y gaseoso) en cantidades suficientes para propiciar que el radio de afectación abarque completamente o rebase la propia instalación peligrosa (UABC, AM, & Sedesol, 2011).

Los radios o distancias de afectación dependen de la cantidad y tipo de material peligroso utilizado, siendo los más extensos (hasta 500 m) los radios de algunas plantas potabilizadoras de agua (material tóxico) y de la compañía de gas (material inflamable). Sin embargo, en algunos parques industriales, se presentan traslapes de radios de varias industrias peligrosas, de manera que un

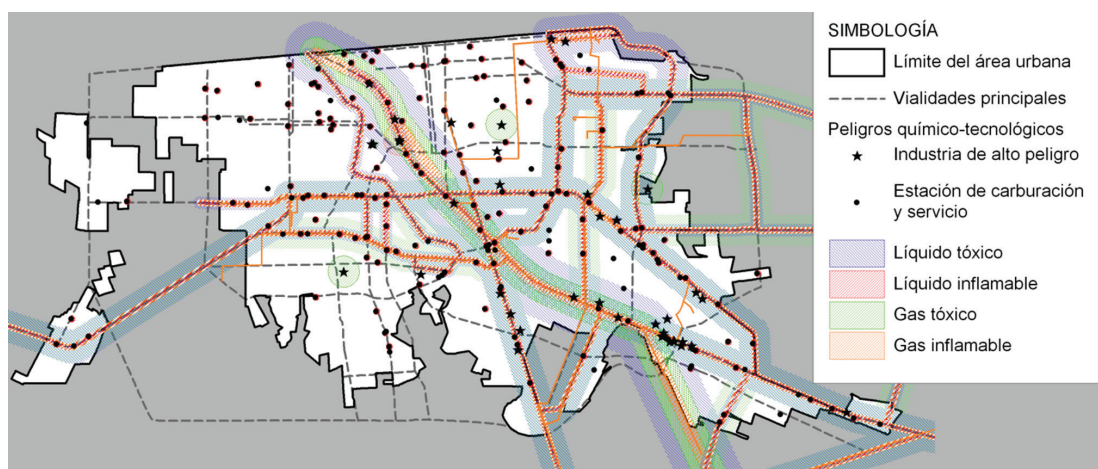
2 Tratado sobre distribución de aguas internacionales entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América.

3 Cloro, Amoniaco, Ácido nítrico y Peróxido de Hidrógeno.

4 Gas Licuado de Petróleo, Acetileno, Hidracina y Gasolina.

evento químico en una instalación (evento principal) puede derivar en incidentes en las industrias aledañas (eventos secundarios), magnificando los daños y pérdidas.

Figura 4. Zonificación de los peligros químico-tecnológicos en la ciudad de Mexicali.



Fuente: elaboración propia con base en UABC, AM y Sedesol (2011).

Por su parte, los derrames, explosiones e incendios en las vialidades principales y vías del ferrocarril, por donde se transporta el material peligroso, puede abarcar hasta siete manzanas consecutivas a cada lado de la vialidad o ferrovía, siendo los puntos más peligrosos los cruces entre el ferrocarril y las vialidades principales.

Los peligros sanitarios

Los peligros sanitario-ecológicos se generan por la acción patógena de agentes biológicos que causan la muerte o afectaciones a la salud de personas, animales y plantas, entre ellas se encuentran las epidemias y plagas, la contaminación ambiental (aire, agua y suelo) y de alimentos (Segob, 2012).

Con respecto a este tipo de peligros, Mexicali es una de las ciudades con los niveles más altos de contaminación del aire en el país, principalmente en partículas suspendidas menores a 10 micras de diámetro (PM_{10}), originado por la presencia de calles no pavimentadas y lotes baldíos en una región semiárida; y aunque la contaminación por monóxido de carbono (CO) tiende a disminuir, el incremento local en automóviles e instalaciones comerciales e industriales puede agravar el problema (INE-Semarnat, 2011). Lo anterior significa que si bien, toda la ciudad está expuesta a la contaminación del aire, este fenómeno es más intenso en las zonas periféricas donde existe un mayor número de predios baldíos y calles no pavimentadas, así como en las zonas industriales (figura 5).

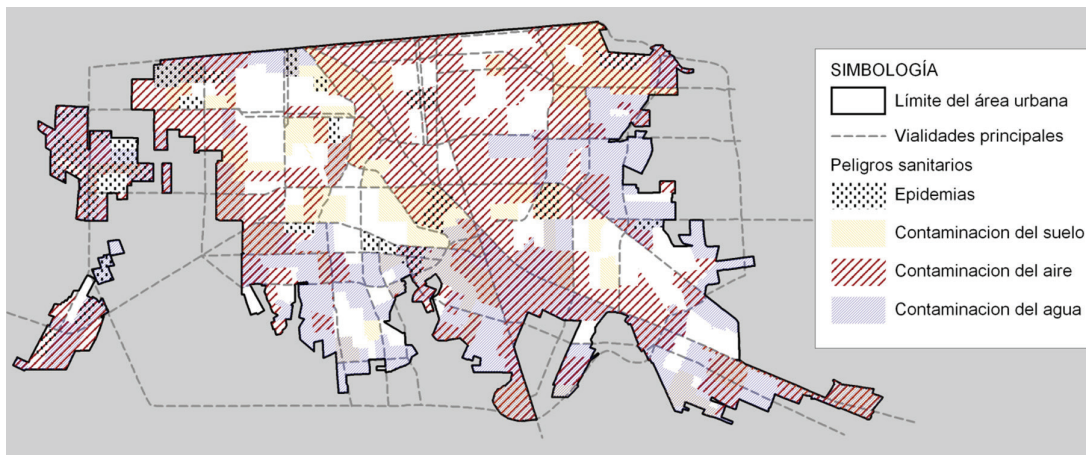
La contaminación del agua se presenta en el Río Nuevo, el cual se alimenta de aguas residuales de retorno agrícola y atraviesa la ciudad (entubado), recibiendo las aguas residuales industriales y

domésticas, para luego cruzar a Estados Unidos (UABC, AM, & Sedesol, 2011). El agua contaminada también se presenta en las lagunas Xochimilco, México y Campestre (al sur de la ciudad de Mexicali), las cuales reciben aportes de diversos drenes agrícolas, algunos de los cuales han quedado atrapados por el crecimiento urbano. Adicionalmente, estos cuerpos de agua se convierten en tiraderos de basura, afectando a quienes habitan próximos a ellos.

La contaminación del suelo urbano se genera principalmente por la presencia de terrenos baldíos convertidos en tiraderos clandestinos, donde la población arroja desechos de todo tipo, y en las proximidades a la unidad de transferencia municipal de residuos sólidos, al sur de la ciudad, alejando a la laguna Xochimilco.

Las epidemias y plagas, se relacionan principalmente con el incremento poblacional de la fauna nociva (ratas, cucarachas, garrapatas, moscas, etc.) en las zonas de la ciudad donde existe contaminación del suelo y de los cuerpos de agua. Ejemplos de ello son la epidemia de *rickettsiosis*, originada por una bacteria (*Rickettsia*) transmitida mediante la picadura o mordedura de artrópodos infectados (garrapatas, piojos, y pulgas) e identificada en Mexicali a partir de 2009 (UABC, AM, & Sedesol, 2011) y las amibas de vida libre, presentes cada verano en los cuerpos de agua de Mexicali, cuya especie *Naegleria fowleri* es considerada como endémica del lugar (Lares et al. 1993).

Figura 5. Zonificación de los peligros sanitarios en la ciudad de Mexicali.



Fuente: elaboración propia con base en UABC, AM y Sedesol (2011).

Los peligros socio-organizativos

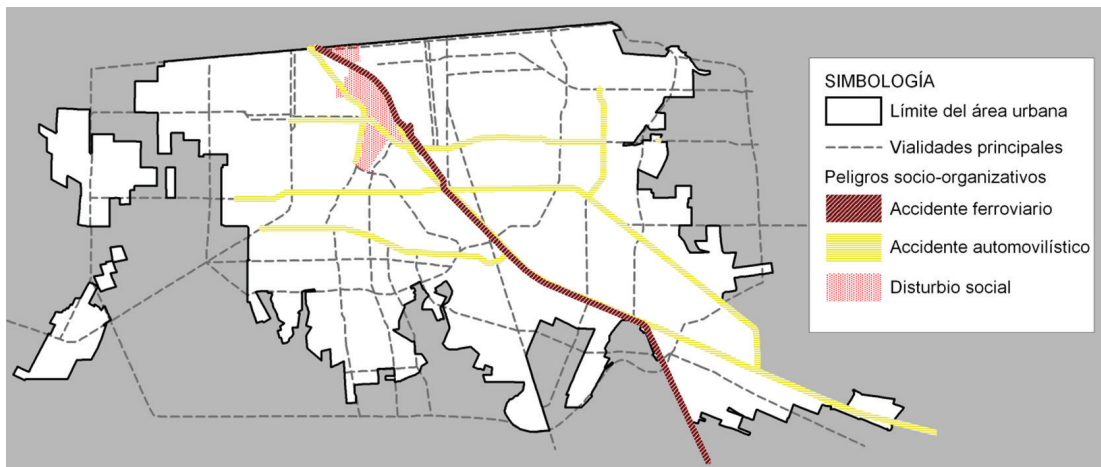
Los peligros socio-organizativos son generados por errores humanos o por acciones premeditadas que se dan en el marco de grandes concentraciones humanas o movimientos masivos de población (Segob, 2012), entre ellos se consideran los accidentes de transporte (aéreo, terrestre y marítimo), disturbios sociales y terrorismo.

En Mexicali, el aeropuerto se encuentra al oriente, lejano a la ciudad, así que aún no se han regis-

trado accidentes aéreos que la afecten directamente. En cambio, los accidentes ferroviarios que involucran atropellados y el colapso con vehículos se han presentado ocasionalmente en los cruces del tren con las vialidades principales. Mientras que los accidentes de tránsito son muy frecuentes en las vialidades principales y los cruces con éstas (ver figura 6).

Los actos de sabotaje y disturbio social, aunque poco frecuentes, se presentan en la forma de motines en los Centros de Readaptación Social (cárceles), manifestaciones y bloqueos en el Centro Cívico y garitas internacionales, y marchas en vialidades donde se localizan oficinas gubernamentales. Con respecto al terrorismo, aunque se reciben llamadas de amenaza de bomba que afectan la central camionera, garitas, aeropuerto, oficinas de gobierno y algunas escuelas, éstas son generalmente falsas, por consiguiente no se incluyó este peligro en la evaluación.

Figura 6. Zonificación de los peligros socio-organizativos en la ciudad de Mexicali.



Fuente: elaboración propia con base en UABC, AM y Sedesol (2011).

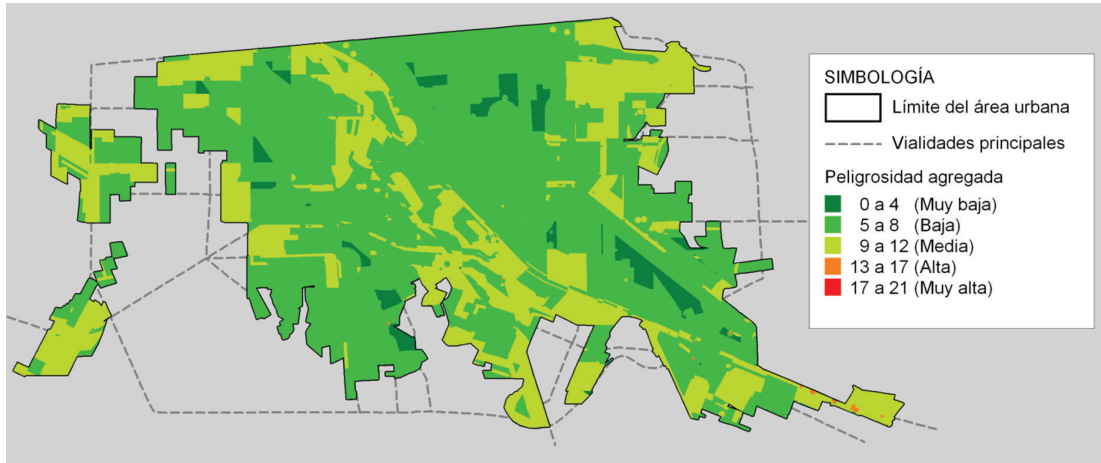
La peligrosidad agregada

De la revisión de la exposición urbana a los peligros sugeridos por Cenapred se seleccionaron los siguientes para el análisis de la peligrosidad agregada: fallas, sismos, taludes inestables, licuefacción, hundimiento, proximidad a ríos, proximidad a canales, inundaciones o estancamientos, frío intenso, calor intenso, vientos fuertes, industria peligrosa, estaciones de servicio, estaciones de carburación, transporte de materiales peligrosos, contaminación del aire, suelo y agua, epidemias, accidentes viales, accidentes ferroviarios y disturbios sociales.

La superposición de los 22 peligros anteriores dio como resultado la figura 7, donde se observa que la ciudad presenta niveles de exposición que van de muy bajo a alto. El 3.4% de la mancha urbana presenta una peligrosidad muy baja, mientras que 67.2% de ésta presenta un nivel de peligrosidad bajo. El 29.3% de la superficie restante tiene una peligrosidad media (exposición de 9 a 12 peligros) y se ubica tanto en la periferia como en una diagonal que cruza la mancha urbana de

noroeste a sureste, y sólo 0.1% de la superficie urbana presenta una peligrosidad alta (de 13 a 17 peligros), aunque ésta se manifiesta a manera de puntos aislados distribuidos principalmente en la zona sureste.

Figura 7. Niveles de peligrosidad agregada en la ciudad de Mexicali.



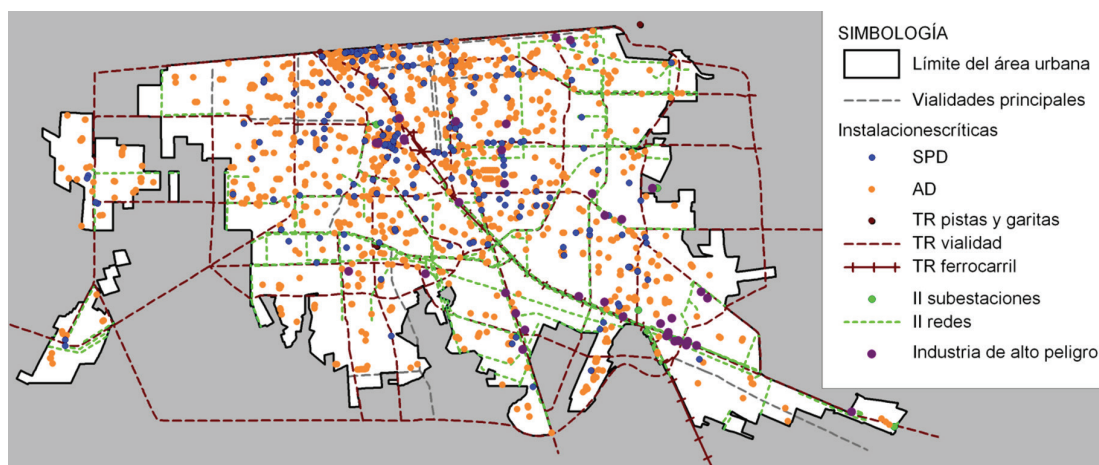
Fuente: elaboración propia con base en UABC, AM y Sedesol (2011).

LAS INSTALACIONES CRÍTICAS URBANAS

En el inventario se identificaron un total de 1410 instalaciones críticas en la mancha urbana de Mexicali, donde predominan las ocupaciones de alta densidad (68%) y de seguridad pública y defensa (16%) sobre el resto: transporte (5%), redes de infraestructura (9%) e industria altamente peligrosa (3%) (tabla 3). Cabe aclarar que la base de datos utilizada (DENUE de INEGI, 2009) presenta algunas inconsistencias en la localización de las unidades económicas y su clasificación, por lo que los resultados presentados en esta sección deberán ser tomados como una evaluación preliminar de la que puede desprenderse un trabajo de campo que permita obtener el inventario real de instalaciones críticas.

Las instalaciones identificadas se distribuyen por toda la ciudad (ver figura 8), aunque algunas de ellas tienen mayor presencia en la parte central de ésta (SPD y AD) y otras en la periferia (TR, II e IN), lo cual sucede por la propia naturaleza de la instalación y del crecimiento de la ciudad. Por ejemplo, los parques industriales se localizan en la periferia urbana por lo tanto las industrias peligrosas, así como las redes que suministran a este sector económico tienden a ser periféricas, sólo la industria más antigua ha quedado atrapada en la parte media de la mancha urbana y, junto con ella, algunas plantas de tratamiento de agua, ductos de gas, entre otras instalaciones. Por su parte, la localización del equipamiento urbano (escuelas, hospitales, iglesias, teatros, entre otras) sigue la lógica de la demanda espacial, de tal forma que llegan a la periferia sólo cuando se ha acumulado una cantidad suficiente de población en dicha zona.

Figura 8. Distribución de las instalaciones críticas en la ciudad de Mexicali.



Fuente: elaboración propia con base en UABC, AM y Sedesol (2011).

La superposición de peligros e instalaciones dio como resultado las tablas 2 y 3. En la tabla 2 se observa que 98.3% de las instalaciones críticas presentan un grado de exposición que va de bajo a medio. Sin embargo, cierto porcentaje de las instalaciones tipo II, TR e IN presentan exposición alta (20%, 5% y 3% respectivamente) y 2% de las instalaciones TR tienen un nivel muy alto de exposición, consecuentemente éstas deberán ser atendidas de manera prioritaria en la mitigación de riesgos. Entre ellas se encuentran: 2 juzgados, 1 escuela, 13 vialidades principales, 1 vía del ferrocarril, 1 línea de comunicación, 3 líneas de alta tensión, 2 ductos de gas natural y 1 industria peligrosa que maneja material inflamable (tabla 3). Por lo que valdría la pena analizar la situación de cada caso, y en particular de las oficinas, escuelas e industrias para valorar la conveniencia de su reubicación.

Tabla 2. Nivel de exposición de instalaciones críticas.

Infraestructura crítica	Nivel de exposición					Total
	Muy bajo (0 a 4)	Bajo (5 a 8)	Medio (9 a 12)	Alto (13 a 16)	Muy alto (17 a 21)	
SPD	0%	65%	34%	1%	0%	100%
AD	0%	75%	25%	0%	0%	100%
TR	0%	28%	51%	20%	2%	100%
II	0%	23%	72%	5%	0%	100%
IN	0%	48%	50%	3%	0%	100%
Total	0.0%	65.6%	32.7%	1.6%	0.1%	100%

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Inventario y nivel de exposición de las instalaciones críticas.

Sistema	Tipo de instalación	Inventario	Peligrosidad acumulada		
			Baja	Media	Alta y muy alta
SPD	Instalaciones de defensa civil	1	100%	0%	0%
	Centros de comunicación	91	69%	31%	0%
	Centros de manejo de emergencia	1	100%	0%	0%
	Estaciones de bomberos	9	56%	44%	0%
	Hospitales y otras instalaciones médicas	55	84%	16%	0%
	Refugios de emergencia para la población	6	67%	33%	0%
	Estaciones de policía y otras para la seguridad pública	56	41%	55%	4%
AD	Auditorios, teatros, estadios	23	65%	35%	0%
	Iglesias	35	57%	43%	0%
	Centros educacionales	829	78%	22%	0%
	Hoteles	47	60%	40%	0%
	Edificios de oficinas	21	24%	76%	0%
	Instituciones penales	1	0%	100%	0%
TR	Vías aéreas (aeropuertos, helipuertos)	6	67%	33%	0%
	Carreteras (vías, puentes, túneles, pasos a desnivel)	58	24%	53%	22%
	Ferrocarril (vías, túneles, caminos, patios, depósitos)	1	0%	0%	100%
	Vías de agua (canales, esclusas, puertos, diques, muelles)	0	-	-	-
II	Comunicaciones	18	11%	83%	6%
	Energía eléctrica	104	24%	73%	3%
	Instalaciones petroquímicas	5	0%	60%	40%
	Agua potable	3	100%	0%	0%
	Aguas servidas	0	-	-	-
IN	Materiales corrosivos	0	-	-	-
	Materiales explosivos	0	-	-	-
	Materiales inflamables	6	0%	83%	17%
	Materiales radioactivos	0	-	-	-
	Materiales tóxicos	28	57%	43%	0%
Varios materiales peligrosos	6	50%	50%	0%	
AG	Alimentos	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	Sistemas de riego	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	Almacenamiento de agua	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
TOTAL		1410			

Fuente: elaboración propia.

Por su parte, 32.7% de las instalaciones tienen un nivel de exposición medio a los peligros del entorno (de 9 a 12 peligros), entre las que se encuentran 74 de tipo SPD (28 centros de comunicación, 4 de las 9 estaciones de bomberos urbanas, 9 instalaciones médicas, 2 refugios para emergencias y

31 instalaciones relacionadas con la seguridad pública), 240 de tipo AD (8 lugares de espectáculos, 15 iglesias o templos, 181 escuelas de todos los niveles, 19 hoteles, 16 edificios de oficinas gubernamentales y 1 institución penal), 33 de tipo TR (1 garita internacional, 1 helipuerto y 31 vialidades principales), 94 de tipo II (105 líneas de comunicación, 76 líneas de alta tensión, y 3 ductos de gas natural), 20 de tipo IN (5 material inflamable, 12 de material tóxico y 3 con varios materiales) (ver tabla 3). La revisión de estas instalaciones en campo, puede proporcionar información relevante para la selección de aquellas que requieren medidas de protección especial.

CONCLUSIONES

En el desarrollo de la evaluación multi-peligro se pudo observar que la ciudad de Mexicali se encuentra expuesta a 22 de los peligros que Cenapred ubica en el territorio nacional, los cuales se manifiestan con niveles distintos y de manera heterogénea en el espacio urbano. Así, la población, los equipamientos, las actividades productivas, las redes e infraestructuras, entre otros elementos urbanos, según su localización, se encuentran expuestos a grupos de peligros distintos, consecuentemente en la gestión del riesgo urbano, resulta necesario establecer líneas de acción diferenciadas para cada elemento y cada localización.

Entre todos los elementos, las instalaciones críticas urbanas, como potenciales magnificadoras del riesgo de desastre (porque implican la parálisis de las funciones vitales urbanas durante la emergencia o conllevan a mayores pérdidas humanas), requieren ser atendidas de manera prioritaria en cualquier estrategia de mitigación de riesgos. Sin embargo, en el ejercicio realizado, se presentaron problemas para generar un inventario adecuado para la escala urbana, no sólo por las inconsistencias de la base de datos disponible, sino por la carencia de criterios de selección adecuados para las escalas local y urbana. En este sentido, un paso fundamental en la gestión del riesgo de desastre es la definición de qué se considera una instalación crítica a nivel nacional, estatal y para cada asentamiento humano, de tal forma que puedan derivarse inventarios de instalaciones cuya protección sea atendida de manera prioritaria en las distintas escalas.

Por lo anteriormente expuesto, tal como ha sucedido en los países desarrollados, en México es indispensable la conformación de un sistema nacional de protección de las instalaciones críticas ante los distintos peligros del entorno que asuma la evaluación multi-peligro como una herramienta de diagnóstico básica, de tal forma que sirva de insumo a evaluaciones más complejas como lo son la identificación de cadenas de eventos, la modelación de escenarios de desastre, la evaluación de la vulnerabilidad y resiliencia, es decir, que facilite la generación de información para tomar decisiones que conlleven a la construcción de ciudades más seguras en el camino al desarrollo sustentable.

REFERENCIAS

- Cenapred (Centro Nacional de Prevención de Desastres) (2001). *Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México, Atlas nacional de riesgos de la república mexicana*. México: Segob, Cenapred, Sina-proc.
- Cenapred (Centro Nacional de Prevención de Desastres) (2006). *Guía Básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de peligros y Riesgos*. México: Cenapred.
- García-Cueto, O. R. (2006). *Balance de energía y capa límite superficiales sobre distintos usos del suelo en la ciudad de Mexicali, B. C.* (Tesis de doctorado). UNAM, México.
- Gobierno de España (2011). *Ley 8/2011, de 28 de abril, por la que se establecen medidas para la protección de las infraestructuras críticas*. Boletín Oficial del Estado, número 102, 29 de abril de 2011 (pp. 43370-43380).
- INE-Semarnat (Instituto Nacional de Ecología-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2011). *Cuarto almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas (2000-2009)*. México: INE-Semarnat.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2009). *Diccionario Estadístico Nacional de Unidades Económicas* [Archivo de datos]. México: INEGI.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010* [Cartografía censal urbana]. México: INEGI.
- Lares Villa, F., De Jonckheere, J. F., De Moura, H., Rechi, Iruretagoyena, A., Ferreira, E., Fernández, G., Ruíz, Matus, C., & Visvesvara, G. S. (1993). Five Cases of Primary Amebic Meningoencephalitis in Mexicali, Mexico: Study of the Isolates. *Journal of Clinical Microbiology*, 31 (3), 685-688.
- Ley, J., Denegri, F. M., & Ortega, L. M. (2015). Spatial dimensión of urban hazardscape perception: The case of Mexicali, Mexico. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 14, 487-495. doi: 10.1016/j.ijdr.2015.09.012
- Lira, H. (2005). Actualización del modelo geológico conceptual del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC. *Geotermia*, 18 (1), 37-46.
- Molin, H. (1997). Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales. En A. Lavell (comp.), *Viviendo en riesgo. Comunidades vulnerables y prevención de desastres en America Latina*, (pp.5-10). Recuperado de http://www.desenredando.org/public/libros/1994/ver/ver_final_nov-20-2002.pdf
- Moteff, J., & Parfomak, P. (2004). *Critical Infrastructure and Key Assets: Definition and Identification*. (CSR Reporte RL32631). Recuperado de <http://fas.org/sgp/crs/RL32631.pdf>
- Naciones Unidas (2002). *Informe de la Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sostenible. Johannesburgo (Sudáfrica), 26 de agosto a 4 de septiembre de 2002*. Nueva York: Naciones Unidas.
- Naciones Unidas (2005). *Informe de la Conferencia Mundial sobre la Reducción de los Desastres*. Kobe, Hyogo (Japón), 18 a 22 de enero de 2005. Recuperado de http://www.unisdr.org/files/1037_finalreportwcdsrspanish1.pdf
- Office of the president (2003). *The National Strategy for the Physical Protection of Critical Infrastructure and Key Assets*. February, 2003. Washington: The White House.
- OEA (Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente. Secretaría Ejecutiva para Asuntos Económicos y Sociales, Organización de los Estados Americanos) (1993). *Manual sobre el manejo de peligros*

- naturales en la planificación para el desarrollo regional integrado*. Washington, D.C.: OEA.
- Perles, M. J., & Cantarero, F. (2010). Problemas y retos en el análisis de los riesgos múltiples del territorio. Propuestas metodológicas para la elaboración de cartografías multi-peligros. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (52), 245-271.
- Pitney Bowes Software Inc. (2009). Mapinfo Professional (10.0) [software para SIG]. Nueva York: Pitney Bowes.
- Rodríguez, J. M. (2002). Los desastres naturales en Mexicali, B. C. Diagnóstico sobre el riesgo y la vulnerabilidad urbana. *Frontera Norte*, 14 (27), 123-153.
- Segob (Secretaría de Gobernación) (2012). *Ley General de Protección Civil*. Diario Oficial de la Federación 6 de junio de 2012. México.
- Unión Europea (2010). *Programa Europeo para la Protección de las Infraestructuras Críticas*. Recuperado de http://europa.eu/legislation_summaries/justice_freedom_security/fight_against_terrorism/133260_es.htm
- UABC, AM, & Sedesol (Universidad Autónoma de Baja California, Ayuntamiento de Mexicali y Secretaría de Desarrollo Social) (2011). *Atlas de riesgos del municipio de Mexicali. Actualización 2011*. Mexicali.

Análisis geoespacial en los estudios urbanos

Publicación electrónica
con distribución por internet.

Universidad Autónoma de Baja California

Universidad Nacional Autónoma de México

Sociedad Latinoamericana de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial



