

Evaluación de *tradeoffs* entre servicios ecosistémicos urbanos a escala megalopolitana

Tradeoffs evaluation among urban ecosystem services at the megalopolitan scale

IVÁN VILCHIS MATA*

Abstract

Moving towards sustainable development requires understanding urban ecosystem services (UES). This work applies hierarchical and multi-criteria tradeoffs analysis to evaluate and explain the exchange relationships between UES: water, air, and climate produced and supported by the urban socio-ecological system in five major metropolitan areas of the Megalopolis of the Metropolitan Area of the Valley of México (MZMVM) during 2010-2016. The preference for UES supply is revealed over UES regulation (temporarily, spatially or interpersonally). Therefore, the importance of supporting decision-making in the formulation of public policies is highlighted.

Keywords: *tradeoffs, urban ecosystem services, megalopolis, cities, sustainability*

Resumen

Avanzar hacia un desarrollo sostenible requiere comprender los servicios ecosistémicos urbanos (SEU), este trabajo aplica un análisis de *tradeoffs*, jerárquico y multicriterio para evaluar y explicar las relaciones *tradeoffs* entre SEU: agua, aire y clima. Producidos y soportados por el sistema socioecológico urbano en las cinco zonas metropolitanas más importantes de la Megalópolis de la Zona Metropolitana del Valle de México (MZMVM), periodo 2000-2016. Se devela la preferencia del SEU de abasto sobre los SEU de regulación (de forma temporal, espacial o interpersonal). Por tanto, resalta su importancia en apoyo a la toma de decisiones en la formulación de políticas públicas.

Palabras clave: *tradeoffs, servicios ecosistémicos urbanos, megalópolis, ciudades, sostenibilidad*

Introducción

Las ciudades son los motores del desarrollo en el siglo XXI, pero si no son conducidas con un enfoque de desarrollo sostenible pueden convertirse en fuentes de serios problemas económicos (e.g. ineficiencia), sociales (e.g. pobreza y desigualdad) y medioambientales (e.g. contaminación y falta de agua), es decir, pueden ser ciudades insostenibles (Garrocho y Sobrino, 2018).

Este panorama se intensifica por la presión, competencia y amenaza sobre los recursos naturales claves para la supervivencia, funcionamiento y bienestar en múltiples ciudades del mundo, incluidas las de México (UNEP, 2016; WEF, 2018), ejemplos notables son los problemas de contaminación que no reconocen límites administrativos, conflictos por recursos —especialmente agua y suelo—, competencia económica sin visión colectiva (por la falta de cooperación entre múltiples agentes y gobiernos), exclusión social, pobreza urbana y marginación (Leese y Meisch, 2015; Embid y Martín, 2017; Oswald-Spring, 2017, Vilchis-Mata *et al.*, 2018).

México es un país urbano y crecientemente metropolitano (Garrocho, 2013), sus ciudades y zonas metropolitanas han afrontado, por regla general, de manera desarticulada, problemas que están íntimamente relacionados (Rosique-Cañas, 2010; Delgado, 2016). Esta situación ha causado territorios asimétricos, difusos y empobrecidos, es decir, ciudades fragmentadas administrativamente, pero entrelazadas funcionalmente en grandes aglomeraciones a las que se les ha llamado megalópolis.

Las megalópolis registran mayor potencial para desarrollar conflictos políticos que se traducen en inestabilidad y vulnerabilidad ambiental, económica y social (Prévôt-Schapiro, 2001), lo cual atenta contra el desarrollo de ciudades prósperas, es decir, ciudades sostenibles, seguras, saludables y resilientes (ONU-Hábitat, 2013).

Es evidente que las ciudades representan uno de los engranajes clave en la compleja maquinaria donde se juega el futuro de México. Sin embargo, el proceso de toma de decisiones urbanas con enfoque sostenible es complicado, implica considerar la interacción dinámica sociedad-ecosistema (e.g. patrones de urbanización y sus vínculos con el medioambiente) a través del tiempo y el espacio (Ostrom, 2009). El concepto de sistema socioecológico como herramienta y unidad de análisis de espacios rurales y urbanos evidencia la interdependencia e interacción de beneficios y perjuicios sociales y ecológicos (bajo una relación -adaptativa- de conexión compleja hombre-naturaleza-territorio), en cuyo interior coexisten servicios ecosistémicos (Balvanera y Cotler, 2009; Quiroz-Rosas, 2017). Desde una perspectiva de la *ciudad como sistema socioecológico* (SSE) se detectan interrelaciones múltiples y complejas entre las seis dimensiones clave del

desarrollo sostenible (medioambiental, económica, social, política, administrativa e institucional) (GIZ e ICLEI, 2014; Quiroz-Rosas, 2017).

En este sentido, la base para un desarrollo sostenible en las ciudades se constituye —en gran parte— por el desempeño de los servicios ecosistémicos urbanos (SEU) que las ciudades ofrecen en beneficio de la población (Bolund y Hunhammar, 1999; Szumacher y Malinowska, 2013; McPhearson *et al.*, 2015). Los SEU —también llamados servicios ambientales— se refieren a los beneficios directos o indirectos proporcionados a la población por los ecosistemas en espacios urbanos, interconectados con los procesos ambientales, económicos, sociales y culturales que en la ciudad se desarrollan, necesarios y estrechamente vinculados con el bienestar, la salud y la seguridad de la sociedad, y cuyas causas de degradación (vinculada con cambios demográficos, patrones de consumo y producción, institucionales y culturales) contribuyen al incremento de desigualdades, pobreza y conflictos sociales.

Los SEU son clasificados como servicios de provisión, de regulación y culturales y son sustentados por los servicios de soporte (Bolund y Hunhammar, 1999; MEA, 2005, TEEB, 2011), por tanto, en este contexto de alta complejidad e incertidumbre (e.g. conflictos e implicaciones de degradación ambiental insostenible), la toma de decisiones urbanas implica, casi inevitablemente, asumir *tradeoffs* (Rodríguez *et al.*, 2006; Sepúlveda, 2008; Martín-López y Montes, 2011; Wegner y Pascual, 2011).

El concepto de *tradeoffs* —o compromisos— se refiere a la pérdida de disponibilidad de productos, factores, servicios o beneficios, tanto ambientales y económicos, como sociales, en el deseo de tener más de otro, que no sea complementario ni compensatorio, lo cual se produce cuando el aumento de uno provoca el descenso de otro, ya que su demanda no puede satisfacerse simultáneamente. En muchas ocasiones, debido a su dependencia, los costos-beneficios o ventajas-desventajas pueden recaer en actores sociales ajenos al proceso de origen (Sepúlveda, 2008).

El *tradeoff* se basa en las teorías de toma de decisión (e.g. multicriterio) ante problemas que generan conflictos (costo-beneficio), tradicionalmente es utilizado en políticas y estrategias de proyectos de negocio en términos de tiempo, costo y resultado (Modigliani y Miller, 1958; Myers, 1977).

El análisis de *tradeoffs* es necesario para avanzar hacia el desarrollo urbano sostenible; al considerar, simultáneamente, múltiples funciones objetivo para la ciudad es más probable mejorar el bienestar humano y salvaguardar el desarrollo de ecosistemas sostenibles, ello, en sinergia con la formulación de políticas más informadas para guiar el proceso de planeación urbana (Lang y Song, 2018).

Debe subrayarse que el estudio de los SEU, desde la perspectiva analítica de los *tradeoffs*, es un campo relativamente nuevo y escaso a escala

megalopolitana (Marshall, 2018); sería útil contar con un método de cuantificación de *tradeoffs* entre componentes de los SEU para apoyar la toma de decisiones urbanas con enfoque sostenible, que es justo lo que se hace para la aglomeración urbana más poblada del país: la Megalópolis de la Zona Metropolitana del Valle de México (MZMVM).

Este trabajo, de carácter cualitativo, tiene como objetivo medir los *tradeoffs* (cuenta con un sistema y una escala de evaluación) entre tres variables ambientales estratégicas, incluidas en dos SEU: 1. De provisión (agua) y 2. De regulación (aire y clima). La medición de los *tradeoffs* se concentra en el SEU de soporte (suelo urbano) en las cinco principales zonas metropolitanas de la MZMVM: Valle de México, Puebla-Tlaxcala, Toluca, Querétaro y Cuernavaca. Estas cinco grandes ciudades concentran 91% de la población de la MZMVM, lo que equivale a 41% del total de población residente en zonas metropolitanas de todo el país y a una cuarta parte de la población nacional (26%) (Sedatu-Conapo-Inegi, 2018).

El desafío de evaluar, representar y desentrañar la distribución de los SEU en el espacio y el tiempo debe resolverse con una metodología sólida, replicable, práctica y espacialmente explícita (Fontana *et al.*, 2013). Una metodología realmente útil para las ciudades de México. La literatura especializada ofrece dos coincidencias para lograr estos propósitos: en primer lugar, la evaluación de *tradeoffs* se articula en tres ejes conceptuales claves: *i*. Temporal: beneficios ahora y costos-riesgos a largo plazo (piedra angular del desarrollo sostenible); *ii*. Espacial: beneficios en un lugar y costos-riesgos en otro (e.g. sistemas hídricos superficiales y subterráneos, contaminación); y *iii*. Interpersonal: beneficios para unos y costos-riesgos para otros (escenarios de ganadores-perdedores) (Martín-López y Montes, 2011; Outeiro y Villasante, 2013; Hauck *et al.*, 2013). La segunda coincidencia es que se requiere un marco metodológico de integración y mapeo de los SEU, así como de instrumentos de apoyo a la toma de decisiones y manejo de recursos, aplicando análisis espacial multicriterio (AMC). Estos instrumentos deben enfatizar procesos de análisis jerárquico (AHP) utilizando sistemas de información geográfica (SIG) (De Groot *et al.*, 2002; Esse *et al.*, 2014).

El trabajo se estructura en seis secciones: en la primera se conceptualizan los servicios ecosistémicos urbanos (SEU) a partir de la literatura especializada, con especial interés en sus interconexiones y *tradeoffs*; en la segunda se aborda la articulación de las ciudades como detonante de estructuras complejas de aglomeración megalopolitana. Estas articulaciones se constituyen, básicamente, de la interacción recíproca y continua de retroalimentación antrópica y ecológica, que transforman —por presión, competencia y amenaza de recursos— el paisaje natural en un ecosistema artificial, con un importante deterioro ambiental que altera la provisión

de SEU. En la tercera sección se presenta una breve aproximación a la aglomeración urbana más importante de México, la MZMVM, se destacan sus principales características de estructura y funcionalidad. En particular, el interés se centra en la importancia de tres variables (agua, aire y clima) de los dos SEU (de provisión y de regulación) estratégicos para este trabajo.

En la sección cuatro se describe el proceso metodológico y analítico de evaluación de *tradeoffs*. Incluye tres fases: seleccionar datos disponibles de los SEU, desarrollar el análisis jerárquico (AHP) para ponderar los SEU, e integrar al análisis espacial multicriterio (AMC) a los SEU ponderados en el SIG. En el quinto apartado se sintetizan los resultados por tipología de *tradeoffs* (temporales, espaciales e interpersonales) y se presentan cinco mapas de aptitud de riesgo —influencia negativa al bienestar y calidad de vida de la población— para cada una de las zonas metropolitanas. Estos mapas son resultado de la combinación de las tres variables de los dos SEU, a través de un promedio ponderado de combinación lineal (WLC por sus siglas en inglés). En conjunto, constituyen un primer acercamiento —de carácter espacial— a la toma de decisiones. En la sexta y última parte se sintetizan las conclusiones y aportes del trabajo, asimismo, se perfilan algunas medidas de política pública. El texto cierra con el listado de referencias consultadas.

1. Servicios Ecosistémicos Urbanos (SEU): interconexiones y *tradeoffs*

Los SEU corresponden al subconjunto de funciones ecológicas (i.e. procesos físicos, químicos y biológicos), que son provistos de manera directa en espacios urbanos (De Groot *et al.*, 2002; 2010; MEA, 2005; TEEB, 2011). Estos SEU se clasifican en: *i*) Servicios de provisión: producción de alimentos y oferta hídrica; *ii*) Servicios de regulación: polinización y dispersión de semillas, regulación climática, moderación de eventos extremos climáticos, reducción de ruido, reducción de escorrentía, purificación del aire y procesamiento de residuos; y *iii*) Servicios culturales: recreación y salud física y mental, desarrollo cognitivo, y cohesión social, los cuales se sustentan y desarrollan con base en Servicios de soporte: hábitat para la biodiversidad (Gómez-Baggethun *et al.*, 2013). Esta noción implica reconocer que los seres humanos (así como otras especies) dependen de los SEU para sobrevivir y prosperar, si se atenta contra éstos se estaría expuesto a un gran riesgo global de extinción, tanto del sistema social como natural (Costanza *et al.*, 2017).

Los SEU representan componentes claves de sostenibilidad, ya que se encuentran directa e indirectamente interconectados y en constante interdependencia con el funcionamiento y dinámica de los sistemas socioecológicos:

las “ciudades” (Haase *et al.*, 2014). Estos sistemas complejos urbanos (estructurales y funcionales por sus características ambientales y socioeconómicas) constituyen un contexto geográfico específico para comprender los cambios entre conexiones y dependencias de las relaciones sociedad-naturaleza, así como los patrones de producción de múltiples funciones de los SEU en las ciudades. Avanzar en su comprensión permitiría diseñar herramientas para mejorar los procesos de toma de decisiones y el diseño de políticas públicas (Holt *et al.*, 2015; Burkhard *et al.*, 2015).

Las investigaciones sobre la evaluación de los SEU (de manera individual o de múltiples SEU) han abordado, al menos, tres grandes temas: *i) Tradeoffs* entre SEU: la gestión se enfoca en uno sólo y se generan/valoran efectos no deseados en otros; *ii) Sinergias entre SEU*: capacidad de alterarlos de manera conjunta (de manera positiva o negativa); y *iii) Pérdidas de SEU*: cambios repentinos, inesperados y no deseados, experimentados por ignorar la dinámica del sistema socioecológico (Bennett *et al.*, 2009).

Existen ejemplos notables al respecto: las revisiones amplias de SEU y su potencial de restauración y transformación del paisaje urbano en Ciudad del Cabo, Nueva York y Barcelona (Gómez-Baggethun *et al.*, 2013); la provisión de SEU por infraestructura verde y su relación con la capacidad de recuperación urbana y resiliencia en la Ciudad de México (Calderón-Contreras y Quiroz-Rosas, 2017); los análisis espaciales de SEU basados en el clima urbano, calidad del aire, retención de aguas pluviales y biodiversidad en Alemania (Grunwald *et al.*, 2017); la detección de *hotspots* y mapeo de *tradeoffs* y sinergias entre SEU (producción de cultivos, ganadería, suministro de agua, almacenamiento de carbono, secuestro de carbono, retención de suelos, apoyo al hábitat y recreación natural) en el suroeste de China (Lin *et al.*, 2018); el descubrimiento de patrones espacio-temporales de cambio y desajustes entre tres SEU (regulación del carbono, mitigación del clima y potencial de recreación) y la vegetación en Bogotá y Santiago de Chile (Dobbs *et al.*, 2018); la evaluación y el mapeo de SEU por cambios de uso de suelo con técnicas de teledetección en Beijín (Haas y Ban, 2018); la evaluación de la inclusión de SEU en instrumentos de política de planeación en 10 municipios de Ontario (Lam y Conway, 2018), sólo por mencionar algunos trabajos sobresalientes vinculados al que aquí se presenta.

Debido a las demandas de recursos y las interconexiones existentes sociedad-naturaleza, optimizar el suministro de un sólo SEU normalmente da lugar a reducciones o pérdidas al resto. Esta situación, casi siempre inevitable, produce *tradeoffs* (disminución de SEU a costa de otro u otros) entre sus distintas categorías, en respuesta a la interacción entre éstos y las actividades socioeconómicas (Turner *et al.*, 2016).

Los *tradeoffs* entre beneficios, costos y riesgos, radican en dos dimensiones extremas: 1. Empobrecimiento por uso insostenible de recursos, impactos y la degradación del medio ambiente; y 2. Relaciones sostenibles sociedad-medio ambiente (Martín-López y Montes, 2011; De Groot *et al.*, 2010). Estos *tradeoffs* pueden generar conflictos por: *a*) La escasez y restricción en que se proporcionan los SEU; y *b*) La distribución de costos-beneficios de los SEU (Costanza *et al.*, 2017).

Por tanto, la evaluación de *tradeoffs* entre SEU, como método de análisis, favorece el establecimiento de prioridades de acuerdo con ciertos objetivos (Amendola *et al.*, 2008). Por ejemplo: facilitar la toma de decisiones en la gestión de los SEU (creando sinergias de administración y conservación) o avanzar hacia una planificación sostenible ante el riesgo de pérdida de SEU en áreas prioritarias (Haase *et al.*, 2012; Holt *et al.*, 2015). Este tipo de situaciones ha quedado demostrada para diversos escenarios y SEU en trabajos de investigación muy destacados (por ejemplo: Rodríguez *et al.*, 2006; Sepúlveda, 2008; Martín-López y Montes, 2011; Wegner y Pascual, 2011; Outeiro, 2013; Hauck *et al.*, 2013; Haase *et al.*, 2014; Marshall, 2018).

2. La escala megalopolitana

Las grandes ciudades contemporáneas se caracterizan por la alta concentración de población, empleo, actividades económicas, equipamiento, servicios básicos (e.g. educativos, salud, legales, abasto). Todo esto genera economías de escala y urbanización que impulsan el desarrollo y las oportunidades de bienestar (Glaeser, 2011; Storper, 2013). Sin embargo, también son sede de gestiones político-administrativas fragmentadas, registran crecientes exposiciones al riesgo de desastre y vulnerabilidad de los habitantes, viviendas, activos e infraestructura (Sedesol-Conapo-Inegi, 2012; GIZ e ICLEI, 2014; ONU, 2015).

A partir de las últimas décadas del siglo XX, la dimensión espacial de la urbanización a nivel mundial ha estado dominada por las megaurbes (Garza y Schteingart, 2010), muchas de ellas son zonas metropolitanas y regiones emergentes megalopolitanas altamente complejas; estas grandes aglomeraciones urbanas representan un enorme reto de desarrollo urbano, especialmente en temas como: *i*. Concentración de población y movimientos intrametropolitanos, *ii*. Ubicación espacio-sectorial de la economía y el mercado de trabajo, *iii*. Expansión urbana que define su estructura espacial, y *iv*. Delimitación que rebasa límites político-administrativos del territorio (Sobrino, 2003).

El desarrollo y crecimiento de ciudades medianas y pequeñas en vecindad con una megaciudad forman conglomerados urbanos (*city clusters*) que actúan como catalizadores del crecimiento económico y de la competitividad, asimismo se vuelven parte de la estructura urbana a escala regional (Shao *et al.*, 2006). Es justamente en el proceso de metropolización donde es más clara la fragmentación a escala de aglomeración megalopolitana, a partir de la tensión permanente de dos componentes: *i.* Aglutinación de bienes; y *ii.* Dispersión de relaciones y compromisos (González-Ortiz, 2014).

Por tanto, la fragmentación refiere a la compleja dinámica urbana asociada con componentes espaciales, sociales y políticos de la metropolización. Por ejemplo, un paisaje urbano con agudas desigualdades sociales se empobrece aún más ante la ausencia de políticas asociadas y coordinadas bajo relaciones político administrativas metropolitanas, lo que genera territorios asimétricos, difusos y empobrecidos, es decir, ciudades fragmentadas en múltiples unidades descoordinadas e ineficientes, pero entrelazadas en grandes aglomeraciones urbanas que funcionan como una sola unidad (Prévôt-Schapira, 2001). La situación de ineficiencia y riesgo es clara cuando la misma ciudad es manejada por varios conductores, descoordinados, y a veces contrapuestos, entre sí (Garrocho, 2013).

Las megalópolis obedecen a un sistema emergente de aglomeración complejo, de carácter polinuclear (i.e. jerarquizado por consolidación, ubicación y grado de equipamiento), disperso y fragmentado, que articula núcleos —nodos— metropolitanos (e.g. población, empleo, transporte, actividades económicas) (Garza y Scheingart, 2010). Constituyen, además, la expresión multifacética de articulaciones e interconexiones funcionales en espacio y tiempo, características del siglo XXI. Esto agudiza la complejidad de los procesos de su gobierno y conducción, así como los encadenamientos de sus interconexiones funcionales (ambientales, económicas, sociales, políticas, institucionales, culturales) en todo el espacio y tiempo megalopolitano (De Alba y Guerrero, 2017).

Por tanto, los desafíos y problemas de desequilibrios socioeconómicos y ambientales en las ciudades están vinculados directamente al proceso de crecimiento urbano fragmentado, desordenado y difuso (Delgado, 2003; Rosique-Cañas, 2010). En estas circunstancias, llama la atención cómo la supervivencia de estas megaurbes (desde un marco analítico de integración como sistema socioecológico) recae en la explotación y aprovechamiento de recursos naturales de su entorno próximo, que se deteriora aún más por la falta de gestiones coordinadas, a pesar de que se sabe que el bienestar humano está vinculado con los servicios ecosistémicos provistos por los entornos urbanos (De Groot *et al.*, 2010; Oswald-Spring, 2017).

Este contexto de distintas escalas de decisión descoordinadas, acentúan los *tradeoffs* entre desarrollo y conservación. En otras palabras, las relacio-

nes de integración, afectación y repercusión mutua de las decisiones descoordinadas generan conflictos e ineficiencias (e.g. pobreza y desigualdad), afectan la estructura y funcionamiento de los ecosistemas (capital natural) y limitan el desarrollo económico y social (flujo de servicios ecosistémicos urbanos) (Sobrinó *et al.*, 2015). El problema se agrava si sumamos que la gestión del territorio se focaliza en abastecer servicios a costa de reducir suministros (balance abasto-regulación), transformar paisajes urbanos multifuncionales (artificializados) que generan una intensa degradación ambiental, privilegiar los beneficios a corto plazo a costa de perder oportunidades de bienestar humano a largo plazo (Ostrom, 2009; Martín-López y Montes, 2011).

Es justo en ese nicho donde radica la importancia de profundizar y considerar oportunamente los *tradeoffs* entre SEU en la toma de decisiones públicas y privadas. Esto, bajo dos dimensiones claves: 1. Empobrecimiento por el uso insostenible de recursos, la degradación de los ecosistemas y otros múltiples impactos negativos en lo social, lo económico y lo ambiental y 2. Mejoramiento del bienestar humano, incluyendo la relación sostenible sociedad-ecosistema, así como el abastecimiento y mejora de la calidad de vida presente y futura (MEA, 2005).

Este nicho es estratégico para nuestro país si consideramos que México presenta un desarrollo de carácter metropolitano en constante expansión (por la dinámica de la población y las actividades económicas), con implicaciones fundamentales para el desarrollo del país (Garrocho, 2013).

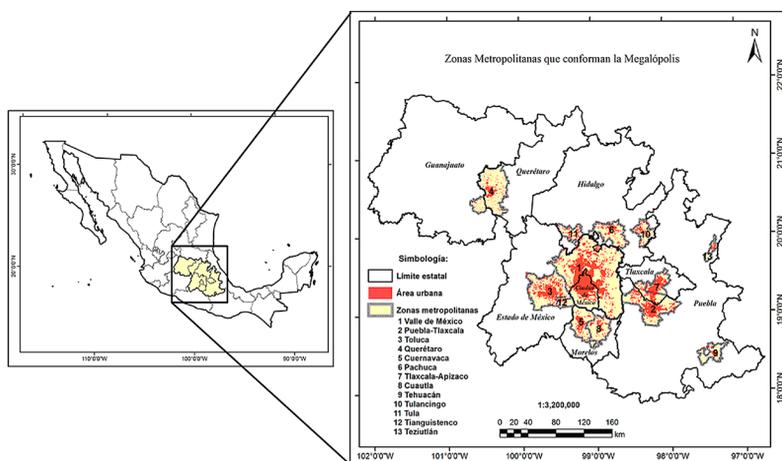
Este proceso de evolución metro y megalopolitana representa todo un desafío de planeación y gestión urbana, ante la tendencia hacia un territorio altamente urbanizado, con marcadas diferencias territoriales y en un marco de acelerado envejecimiento poblacional (Garrocho y Campos, 2016; Garza, 2000; Ordorica, 2006; ONU-Hábitat, 2016a). La conducción megalopolitana eficiente y sostenible requiere con urgencia de políticas de alta intensidad, coordinadas en un contexto de competencia cooperativa (Ihlanfeldt, 1995; Sobrinó *et al.*, 2015).

3. Zona de estudio, materiales y método

La MZMVM se conforma por 194 municipios y alcaldías (de 417), agrupados en 13 zonas metropolitanas (de 72) y distribuidas en ocho entidades: *i*) Valle de México (Ciudad de México, Estado de México e Hidalgo), *ii*) Puebla-Tlaxcala (Puebla y Tlaxcala), *iii*) Toluca (Estado de México), *iv*) Querétaro (Querétaro-Guanajuato), *v*) Cuernavaca (Morelos), *vi*) Pachuca (Hidalgo), *vii*) Tlaxcala-Apizaco (Tlaxcala), *viii*) Cuautla (Morelos), *ix*) Tehuacán (Puebla), *x*) Tulancingo (Hidalgo), *xi*) Tula

(Hidalgo), *xii*) Tianguistenco (Estado de México), y *xiii*) Teziutlán (Puebla). Representa la mega región urbana más importante del país al concentrar, en 2015, un total de 31,046,141 de habitantes, es decir: en 1.1% del territorio (únicamente área urbana: 21,627 km²) se sienta 41.3% de la población residente en zonas metropolitanas y 26% de la población nacional (figura 1).

Figura 1
Conformación de la Megalópolis de la Zona Metropolitana del Valle de México

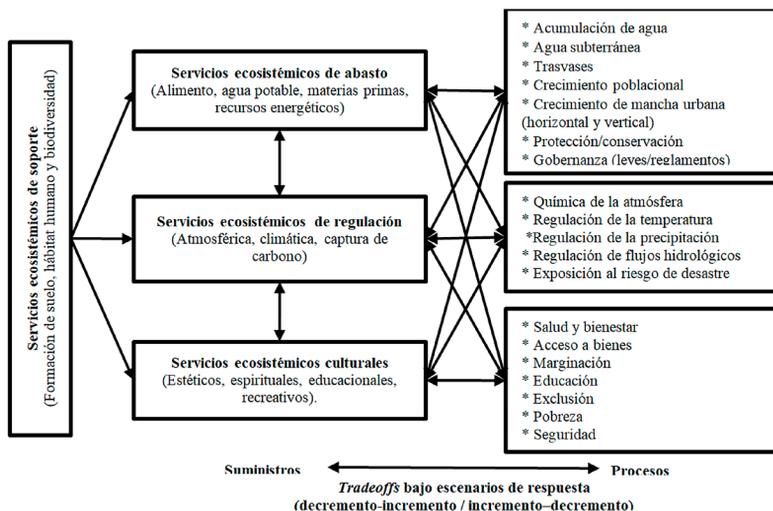


Fuente: elaboración propia.

3.1. Materiales y método

El método de análisis *tradeoffs* permite evaluar la relación costo-beneficio estableciendo factores críticos de éxito que se pueden: *comprometer-sacrificar-negociar* (figura 2). En esencia, se traduce en una herramienta que responde a preguntas de ayuda oportuna en el proceso de toma de decisiones para alcanzar objetivos utilizando diferentes políticas públicas y privadas. El punto de partida fundamental es que se debe prescindir de algo para obtener un beneficio mayor, no existe una relación óptima ganar-ganar, sino que la negociación obedece a una estructura imperfecta. Las relaciones presentes entre variables representan impactos positivos o negativos, por tanto, los *tradeoffs* existirán cuando el mejoramiento de una variable implique un efecto negativo en otra(s). Si el impacto de una

Figura 2
Esquema de funciones y relaciones de tradeoffs entre variables de los servicios ecosistémicos urbanos



Fuente: elaboración propia con base en MEA (2005) y TEEB (2011).

variable es nulo o positivo en otra(s), el *tradeoff* es inexistente (Amendola *et al.*, 2008).

El esquema ejemplifica y permite aproximarnos a comprender la complejidad de funciones y relaciones de algunos de los componentes (variables, dentro del proceso y suministro de SEU, entrelazadas a un SEU de soporte, que en nuestro caso corresponde al suelo urbano de la MZMVM. Estas relaciones distribuidas en forma uni, bidireccional o en todas direcciones, obedecen a las interconexiones dadas las características de las variables, bajo escenarios de beneficios y costos (decrementos/incrementos) entre actores (Outeiro, 2013), con la particularidad de que, a diferencia de las sinergias que se originan cuando ciertos servicios ecosistémicos interactúan con otros, éstos incrementan o decrecientan simultáneamente.

Los *tradeoffs* se producen cuando el incremento de un servicio ecosistémico provoca el decremento de otro (Bennett *et al.*, 2009), es decir, que las variables vinculadas a las funciones ecosistémicas corresponden a procesos (de transferencia de materia y energía) que contribuyen a la provisión de beneficios directos de los SEU a la sociedad, asumiendo que el avance de objetivos (ambientales, económicos, sociales, políticos, administrativos, e institucionales) puede darse de manera simultánea y disociada.

Esta situación produce escenarios de costo-beneficio-riesgo y no necesariamente sinergias y compensaciones entre las dimensiones de la sostenibilidad (Dimitrova *et al.*, 2013). Es importante señalar que no es de interés ahondar exhaustivamente en todas las variables o elementos constitutivos de funciones y relaciones de los SEU, los enunciados en el esquema son sólo algunos de los que son abordados en esta investigación.

Para lograr el objetivo de medir los *tradeoffs* entre el agua, aire y clima en la MZMVM se restringió la zona de estudio a sus cinco principales zonas metropolitanas (Valle de México, Puebla-Tlaxcala, Toluca, Querétaro y Cuernavaca). Estas ciudades concentran 91.3% de la población de la MVMVM y cubren 75.3% (16,287 km²) de su superficie urbana. La evaluación de *tradeoffs* se realizó en tres fases:

- I) Caracterizar espacialmente las variables de los SEU:
 - a. Suelo. Superficie de crecimiento y expansión de suelo urbano (en km²), con base en el Marco Geoestadístico del Inegi (comparativa del periodo 2000-2015). Esta variable se considera como soporte para el desarrollo de los demás SEU.
 - b. Agua. Suministro de agua potable (en l/hab/día), de acuerdo con indicadores de dotación de agua del Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores (PIGOO, valores promedio 2012-2016), identificando aquellas zonas de mayor demanda en función del total de población por AGEB.
 - c. Aire. La concentración de contaminantes (PM 10, PM 2.5 y ozono), bajo un proceso de interpolación de datos correspondientes a las estaciones de monitoreo del Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA) e Informes Nacionales de Calidad del Aire del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) (valores promedio 2014-2016).
 - d. Clima. La variabilidad de la temperatura (máxima y mínima en °C) y la precipitación (acumulada en mm), correspondiente a los cambios promedio observados con base en datos de Cuervo-Robayo *et al.* (2014) relativos a las Superficies Climáticas para México (promedio 1910-2009).

II) Construir un índice ponderado de variables:

Establecer el peso de cada variable respecto a las demás, de acuerdo a un proceso de análisis jerárquico (AHP por sus siglas en inglés) con un preprocesamiento de estandarización (entre 0

y 1) de los valores de cada una de las variables de los SEU. Los valores se ponderaron utilizando el método Delphi (consulta exploratoria a un panel de expertos) y se evaluaron con la matriz de Saaty en el SIG-IDRISI.¹ Los resultados de los SEU ponderados se integraron al análisis espacial multicriterio (AMC) para su representación cartográfica de aptitud en mapas de riesgo. Esto se hizo a partir de una combinación lineal ponderada (WLC), correspondiente a la multiplicación de cada capa (celdas raster de cada uno de los SEU) por el peso de los factores, donde la suma de resultados produce criterios cualitativos de mayor o menor riesgo a la pérdida de SEU para cada una de las cinco zonas metropolitanas.

III) Describir e interpretar contextos:

Identificar las implicaciones de los SEU bajo tres tipos de *tradeoffs* (Martín-López y Montes, 2011; Outeiro, 2013; Hauck *et al.*, 2013):

- i. *Temporales*: beneficios ahora y costos-riesgos a largo plazo.
- ii) *Espaciales*: beneficios en un lugar y costos-riesgos en otro.
- iii. *Interpersonales*: beneficios para unos y costos-riesgos para otros.

4. Resultados de la evaluación

4.1. Fase I

La caracterización de valores promedio de los cuatro SEU por zona metropolitana muestra una visión representativa y comparativa, como parte de un marco integrador de referencia para su comprensión y evaluación (cuadro 1).

El consumo del SEU Suelo de estas cinco zonas metropolitanas obedece a dos fenómenos principales: *i)* Expansión de suelo urbano y *ii)* Atracción y crecimiento natural de la población; resalta que, en general, no existe o

¹ Con la técnica de Saaty los pesos se derivan de una matriz recíproca cuadrada de comparación por pares entre criterios o variables, esta comparación obedece a la importancia relativa (mayor o menor) de los involucrados sobre una escala continua de nueve puntos:

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
sumamente	muy fuertemente	fuertemente	moderadamente	igualmente	moderadamente	fuertemente	muy fuertemente	sumamente
menos importante					mas importante			

Cuadro 1
Integración de valores representativos de los SEU por zona metropolitana

<i>Zona Metropolitana</i>	<i>suelo</i>		<i>agua</i>		<i>aire</i>		<i>clima</i>	
	<i>Expansión de suelo urbano periodo 2000-2015 (en km²)</i>	<i>Dotación periodo 2012-2016 (en l/hab/día)</i>	<i>PM 10 periodo 2014-2016 limite anual NOM-025-SSAI-2014 (40 µg/m³)</i>	<i>PM 2.5 periodo 2014-2016 limite anual NOM-025-SSAI-2014 (12 µg/m³)</i>	<i>Ozono (O₃) periodo 2014-2016 limite 8 h NOM-020-SSAI-2014 (0.070 ppm)</i>	<i>Incremento de Temperatura periodo 1910-2009 (en °C)</i>	<i>Incremento de Precipitación periodo 1910-2009 (acumulada en mm)</i>	
Valle de México	51	200	56	28	0.130	0.69	67.70	
Puebla-Tlaxcala	1054	160	57	26	0.073	0.67	91.90	
Toluca	421	210	75	42	0.091	0.61	92.10	
Querétaro	777	170	35	18	0.061	0.60	91.60	
Cuernavaca	418	320	ND	ND	0.092	0.58	106.70	

ND: información no disponible por falta de equipo para su medición en la red de monitoreo atmosférico.
Fuente: elaboración propia

se sigue una regla respecto al consumo de suelo y la densidad de población (e.g. menor consumo de suelo y mayor densidad de población).

Esta situación evidencia cómo el Valle de México (para el periodo 2000-2015) experimentó la menor expansión de suelo urbano (de tan solo 51 km²) y la mayor concentración poblacional (alcanzando una extensión total de 7,866 km² de superficie urbana con una densidad de población de 2,656 hab/km²); en contraste Puebla-Tlaxcala refleja la mayor expansión (con 1,054 km²) logrando un total de superficie de 2,392 km² y 1,230 hab/km²; la dinámica de Toluca (421 km²) llegó a expandirse a los 2,412 km² con 913 hab/km²; superficie ligeramente superada por la expansión de Querétaro (777 km²) que alcanza un total de 2,427 km² y la menor densidad de población con 545 hab/km²; finalmente, la expansión de Cuernavaca (con 418 km²) se extiende por 1,190 km² en total, con una densidad de 826 hab/km².

Por tanto, estas expansiones son fuentes multifactoriales de cambios de uso del suelo y vegetación, que a su vez demandan el suministro de agua potable, concentran fuentes de emisión de contaminación atmosférica (fijas, móviles, de área y naturales) y que, en conjunto, se vinculan con la modificación del clima urbano.

En este sentido, el suministro del SEU Agua se ve limitado en la práctica de acuerdo con: *i*) la demanda (mayor o menor consumo) y *ii*) el acceso (habitantes en viviendas sin agua). Se presenta superávit (positivo) y déficit (negativo) en el abasto de agua (en l/hab/día), respecto al consumo recomendado por tipo de clima dominante (para nivel socioeconómico medio de acuerdo con la Conagua) de la siguiente forma: el Valle de México con 58 l/hab/día, Puebla-Tlaxcala 18 l/hab/día, Toluca 68 l/hab/día, resalta Querétaro con déficit de -36 l/hab/día, y Cuernavaca 114 l/hab/día.² Si bien estas zonas metropolitanas se encuentran por arriba de la media nacional de 155 l/hab/día, esta situación representa dos encrucijadas: *i*) El consumo señalado (representativo) no implica que efectivamente cada habitante lo reciba y *ii*) El contar con un superávit actual y alta concentración de población es indicador de alta posibilidad de un futuro bajo estrés y déficit hídrico, debido a la tendencia en su deterioro. En síntesis, nos encontramos ante un importante factor de riesgo sanitario propenso a derivar incrementos de enfermedades infecciones y tasas de mortalidad ante la falta de agua apta para consumo humano.

Por otro lado, la calidad del SEU Aire presenta valores que en algún momento y parámetro rebasan los límites establecidos tanto en la nor-

² Con base en el Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, correspondiente a los datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado (Conagua, 2016).

matividad mexicana (NOM), como por la OMS (2005).³ En el caso de PM 10, se tiene para Valle de México (0.4 y 1.8 veces superior a los límites respectivos), Puebla-Tlaxcala (0.4 y 1.8 veces), Toluca (0.9 y 2.75 veces), Querétaro (en cumplimiento y 0.75 veces) y Cuernavaca (sin disponibilidad de datos). Para PM 2.5: Valle de México (1.3 y 1.8 veces respectivamente), Puebla-Tlaxcala (1.2 y 1.6 veces), Toluca (2.5 y 3.2 veces), Querétaro (0.5 y 0.8 veces) y Cuernavaca (sin disponibilidad de datos). El Ozono en Valle de México (0.86 y 1.5 veces respectivamente), Puebla-Tlaxcala (0.04 y 0.4 veces), Toluca (0.30 y 0.8 veces), Querétaro (en cumplimiento y 0.2 veces) y Cuernavaca (0.31 y 0.8 veces). Estos resultados son consistente con lo señalado en el Informe del Secretario General de Naciones Unidas respecto al Progreso en el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2017, donde 9 de cada 10 personas en la ciudad respiran aire contaminado.

Finalmente, el SEU Clima regional (megalopolitano) presenta un incremento en la variable temperatura del orden de los 0.63°C, y un aumento en la precipitación de 90 mm. Es importante señalar que los incrementos de temperatura a nivel local (escala micropolitana) pueden llegar a ser todavía más elevados considerando la relación directa de formación de las islas de calor urbanas, con la infraestructura urbana, los contaminantes atmosféricos y los espacios con áreas verdes disponibles. Por otro lado, la precipitación es un aspecto preocupante. Primero, la respuesta hidrológica de la superficie impermeable urbana ante la caída de una cierta cantidad de lluvia, representa un elemento de vulnerabilidad y riesgo de inundación. Segundo, persiste la falta de aprovechamiento (muy necesario) de esta lluvia como fuente de abastecimiento de agua, y recarga de los acuíferos

4.2. Fase II

El cálculo de pesos de los SEU, de acuerdo con la matriz de Saaty, se obtuvo con una consistencia aceptable de 0.01 (se considera coherente una desviación de 0.1), situación que garantiza su integración en el análisis espacial de toma de decisión multicriterio (AMC). El valor de la ponderación dominante por SUE está dado por el Agua (0.67), seguido por el Aire (0.24), y muy por debajo el Clima (0.09). La evaluación de los *tradeoffs* entre SEU indica que la preferencia y jerarquía de toma de decisiones en la megalópolis bascula en el acceso a SEU de Abasto, en detrimento de los SEU de Regulación.

³ Valores anuales y de 8 horas fijados por las Normas Oficiales Mexicanas (NOM-020-SSA1-2014 y NOM-020-SSA1-2014) para PM10 (40 µg/m³), PM2.5 (12 µg/m³) y O₃ (0.070 ppm). En el caso de las directrices establecidas por la OMS (2005) para PM10 (20 µg/m³), PM2.5 (10 µg/m³) y O₃ (0.051 ppm).

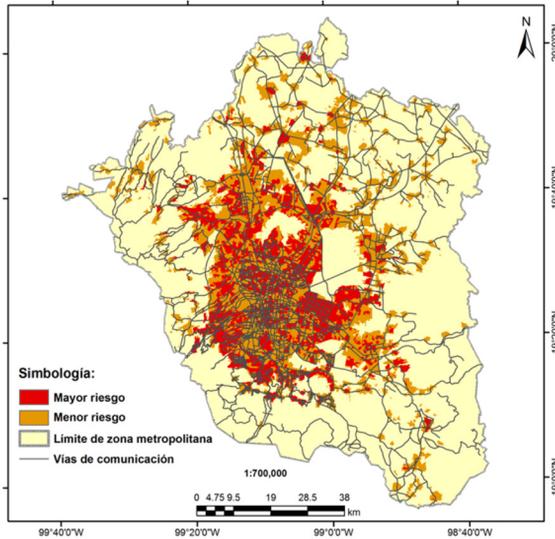
Lo anterior corresponde a que el SEU de soporte Suelo en la MZMVM representa en sí mismo, una variable independiente que existe en el espacio y se desarrolla en el tiempo, de manera disociada y simultánea a costa y con repercusiones importantes, de acuerdo con el siguiente orden: *i*) Desabasto de agua (seguridad hídrica), *ii*) Mala calidad del aire (contaminación) y *iii*) Clima urbano (riesgo hidrometeorológico).

Bajo este escenario, la organización socioespacial megalopolitana puede tornarse confusa, ya que evidentemente los *tradeoffs* son inevitables, al revelarse tensiones permanentes entre SEU. Esta situación, en un acercamiento espacial, se puede apreciar en los mapas de aptitud de riesgo de pérdida de SEU (figuras 3 a 7). En nuestro caso, definido como la capacidad potencial de un sitio específico para cumplir la condición de *tradeoffs*, por la ocurrencia y la sobreposición de componentes (variables) entre SEU. En el entendido de que el concepto de riesgo es el resultado relacionado con la probabilidad de que se manifiesten ciertas consecuencias, no sólo por su grado de exposición sino también por la susceptibilidad o vulnerabilidad de ser afectados por el evento (Wilches-Chaux, 1993). En dichos mapas se resalta la clasificación de zonas de influencia del continuo de valores de SEU, idóneas para generar *tradeoffs*, y por tanto, menor o mayor riesgo de pérdida de SEU.

Los mapas corresponden a la determinación de un balance de dispersión, influenciado por la ubicación, intercambio y combinación de los pesos de las variables utilizadas de los SEU, con base en una técnica que suaviza el promedio de los valores (WLC). Es decir, cada pixel de cada imagen de SEU (con valores estandarizados) es multiplicada por su peso correspondiente, posteriormente se suman los resultados (debe sumar 1), aquí radica la importancia de cómo interactúan los SEU espacialmente.

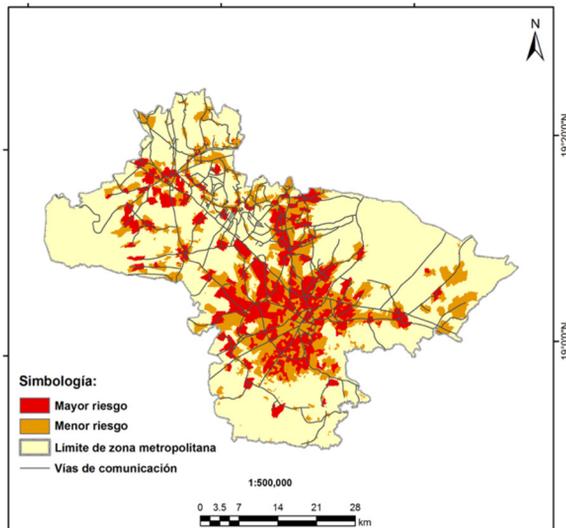
En primer lugar, la caracterización de menor riesgo en los mapas corresponde a pixeles cuya combinación de valores de SEU son extremos, ya sea que todos presenten los valores más bajos o los valores más altos, bajo esta situación, los *tradeoffs* son inexistentes (y corresponden más a una sinergia), ya que basculan en el mismo sentido (ya sea negativo o positivo), en las cinco zonas metropolitanas. En segundo lugar, la caracterización de mayor riesgo asume un grado de intersección global de SEU (combinación de valores de buenas y malas calidades) por encima de la media (i.e. en un rango de 0 a 1, los valores considerados se concentran entre 0.7 y 0.8); la toma de decisiones corresponde a fragmentos particulares que por su génesis no pueden generalizarse tanto en gestión como en acción, pero sí repercuten (de manera positiva o negativa) en el territorio megalopolitano; la magnitud de influencia de criterios es proporcional a las características y complejidad de cada sistema metropolitano.

Figura 3
Mapa de aptitud de riesgo de pérdida de Servicios Ecosistémicos Urbanos en la Zona Metropolitana del Valle de México



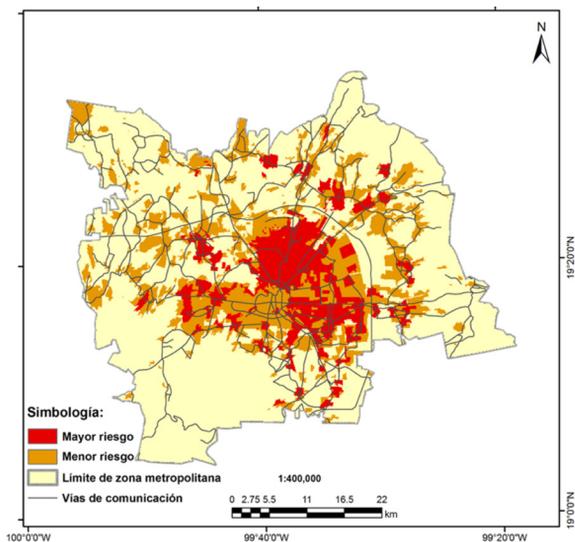
Fuente: elaboración propia.

Figura 4
Mapas de aptitud de riesgo de pérdida de Servicios Ecosistémicos Urbanos en la Zona Metropolitana de Puebla-Tlaxcala



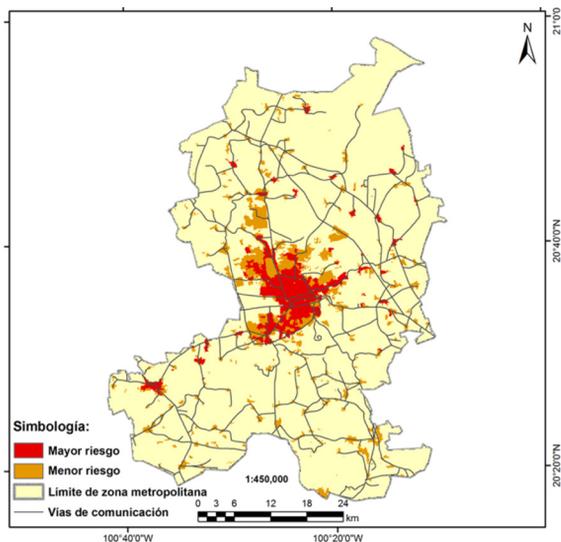
Fuente: elaboración propia.

Figura 5
Mapas de aptitud de riesgo de pérdida de Servicios Ecosistémicos Urbanos en la Zona Metropolitana de Toluca



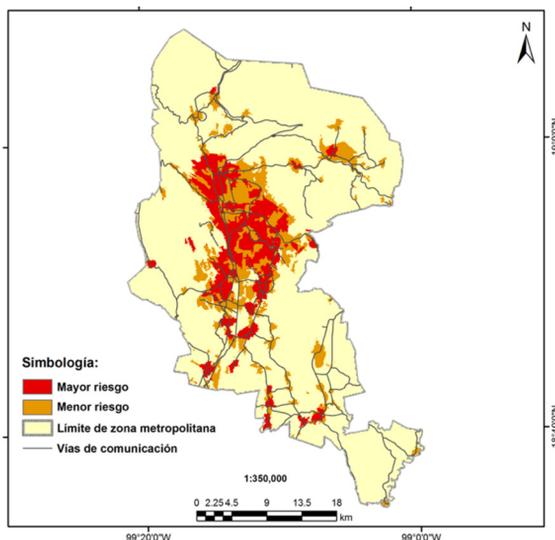
Fuente: elaboración propia.

Figura 6
Mapas de aptitud de riesgo de pérdida de Servicios Ecosistémicos Urbanos en la Zona Metropolitana de Querétaro



Fuente: elaboración propia.

Figura 7
Mapas de aptitud de riesgo de pérdida de Servicios Ecosistémicos Urbanos en la Zona Metropolitana de Cuernavaca



Fuente: elaboración propia.

En el caso del Valle de México, el mayor riesgo de *tradeoffs* está definido espacialmente por combinaciones de valores de volumen del SEU Agua requerido por la cantidad de población, recurrencia de mala calidad del SEU Aire, en orden de relevancia: O_3 (de mayor impacto regional), PM 2.5, y PM 10, cuya extensión total de SEU suelo urbano es equivalente a sumar las superficies de Puebla-Tlaxcala, Toluca y Querétaro.

Para Puebla-Tlaxcala resalta la rápida expansión del SEU Suelo urbano como impulsor de desbaste del SEU Agua, seguido por criterios de calidad del aire en el orden: PM 2.5, PM 10 y O_3 . Respecto a Toluca, la extensión total del SEU Suelo urbano alcanzada (similar a Puebla-Tlaxcala y Querétaro) ejerce mayor influencia sobre el SEU Calidad del aire en orden de relevancia: PM 2.5, PM 10 (ambos parámetros de mayor impacto regional) y O_3 , que sobre el SEU Agua (aun considerando los volúmenes requeridos por la cantidad de población).

Por su parte, Querétaro resalta también por su rápida expansión del SEU Suelo urbano, como detonante de estrés en el SEU Agua (de alto impacto), con criterios de calidad del aire únicamente de PM 2.5 (por parámetros en cumplimiento con la normatividad).

Finalmente, Cuernavaca, con la menor extensión del SEU Suelo urbano, una alta demanda de agua, y con criterios de calidad del aire únicamente de O_3 (por falta de medición para PM 10 y PM 2.5).

Resalta que en las cinco zonas metropolitanas, se incrementa la vulnerabilidad de riesgo, al poseer un alto potencial de modificación en el SEU Clima urbano.

4.3. Fase III

Establecer funciones y relaciones existentes para entender los *tradeoffs* (prioritarios) de la MZMVM representa serias implicaciones:

1. SEU Temporales. Procesos dinámicos que representan un desafío de sostenibilidad.
 - 1.1. Resulta muy difícil equilibrar SEU en condiciones de costo-beneficio-riesgo, asumiendo que no todo puede ser resuelto al mismo tiempo y es crítico en la competencia por la supervivencia (en lo ambiental, económico y social actualmente comprometido).
 - 1.2. Requiere bascular pequeños cambios en preferencia-jerarquía de SEU, en torno a la urbanización, en la disyuntiva de la justicia social e inequidad intergeneracional (horizonte temporal), hacia ciudades sostenibles y saludables (e.g. regenerando recursos escasos e insuficientes como el agua potable, con niveles de calidad del aire aceptables para el bienestar, y adaptación a escenarios climáticos cada vez más catastróficos).
2. SEU Espaciales. Complejidad geoestratégica extendida a escala regional.
 - 2.1. El crecimiento y expansión del suelo urbano pone de manifiesto la atención que habrá que poner en las pequeñas y medianas ciudades colindantes.
 - 2.2. La seguridad hídrica se fragmenta, a su vez, en unidades territoriales críticas con la persistencia regional de agotamiento de fuentes de abastecimiento de agua.
 - 2.3. La dispersión de contaminantes en el aire obedece a dos procesos principales: *i*) La precipitación (limpieza de la atmósfera) con efectos de impacto contaminante (lluvia ácida) en el suelo y el agua, y *ii*) La circulación del viento (cuencas atmosféricas) trasladando contaminantes de sus fuentes de origen a otras zonas metropolitanas.
 - 2.4. Enfoque climático multiriesgos fragmentado, ante la frecuencia-recurrencia de desastres, con baja capacidad de adaptación e infraestructura de respuesta en las ciudades.

3. SEU Interpersonales. Beneficio de transición a un estado sostenible e incluyente.
 - 3.1. Urge acciones de disminución del inminente riesgo de impacto, incapacitación y afectación en la salud (sistema inmunológico) por exposición crónica a altos niveles de concentración de contaminantes en el aire y desabasto de agua, disminuyendo la esperanza de vida.
 - 3.2. La población ve mermados sus niveles de pobreza por transferencia del riesgo, de lastre económico generacional trasladado por carencias sociales (en su vida, salud y economía).
 - 3.3. Se requiere un compromiso y participación integral (gobernanza) en la toma de decisiones y recuperación de imaginarios deseables en la construcción y alcance de escenarios sostenibles.

Conclusiones y aportaciones

Los *tradeoffs* entre servicios ecosistémicos urbanos son inevitables. Discernir entre el desarrollo y la conservación, bajo cierto equilibrio en las dimensiones de sostenibilidad, resulta una tarea difícil, y aún más, a escala megalopolitana, donde la capacidad de sacrificio de SEU, en ciudades que convergen en una inmensa red, abre profundas brechas y cargas forzadas (e.g. funciones vitales, pobreza).

Por tanto, el futuro de la Megalópolis de la Zona Metropolitana del Valle de México dependerá de las decisiones explícitas de gestión tomadas y la ejecución de políticas con enfoque sostenible, guiadas por acciones locales, a fin de evitar llegar a un punto de inflexión y colapso de los beneficios de los SEU proporcionados por las ciudades.

Un paso para avanzar en este sentido corresponde, justamente, a la contribución que da la aplicación del modelo metodológico para la evaluación de *tradeoffs* que presentamos, el cual devela la relevancia de los SEU determinados para el sistema socioecológico (la MZMVM) analizado y ofrece oportunidades clave de éxito para la toma de decisiones, al reconocer que su futuro está en juego.

Resulta imperativo actuar a la brevedad en la priorización de acciones, con base en la espacialización del riesgo de pérdida de SEU y que, a nuestra consideración, deberían jerarquizarse (de acuerdo con las condiciones actuales) de la siguiente manera: *i*) El Aire, *ii*) El Clima, y *iii*) El Agua. En una asíntota de balancear, soportar y prolongar la decadencia de beneficios de los SEU, dando pauta a un debate de retroalimentación y discusión a mayor profundidad.

En este contexto, resulta imprescindible continuar enriqueciendo los análisis (teóricos-empíricos-cualitativos) de evaluación, gestión y prestación de SEU, escasos en las ciudades de México, con base en la ruta de evaluación integral presentada en este trabajo. Evidentemente, el siguiente paso obedece a perfilar evaluaciones a mayor detalle (microescala) y con suficientes componentes o variables, que permitan conocer y comprender *tradeoffs* entre Servicios Ecosistémicos en sistemas complejos en expansión, como son las ciudades; las particularidades de estructura, relaciones y funciones en cada una de ellas establecerán las jerarquías, reglas, y fuerzas impulsoras que pondrán a prueba la capacidad de sostenibilidad, en beneficio de la población, en el espacio y el tiempo.

Referencias

- Amendola, Luis José; Depool, Tibaire y González, José Manuel (2008), “Como alcanzar soluciones satisfactorias aplicando *trade-off* en la dirección y gestión de proyectos”, XII Congreso internacional de ingeniería de proyectos, 9, 10 y 11 de julio, Zaragoza, España, Asociación Española de Ingeniería de Proyectos.
- Balvanera, Patricia y Cotler, Helena (2009), “Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos”, en José Sarukhán (coord.), *Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio*, Ciudad de México, México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, pp. 185-245.
- Bennett, Elena; Peterson, Garry y Gordon, Line (2009), “Understanding relationships among multiple ecosystem services”, *Ecology letters*, 12 (12), Montpellier, Francia, Wiley-Blackwell-French National Center for Scientific Research, pp. 1394-1404.
- Bolund, Per y Hunhammar, Sven (1999), “Ecosystem services in urban areas”, *Ecological economics*, 29 (2), Boston, Estados Unidos de América, International Society for Ecological Economics, pp. 293-301.
- Burkhard, Benjamin; Müller, Anja; Müller, Felix; Grescho, Volker; Quynh, Anh; Bustamante, Jesus Victor “Jappan”; Arida, Gertrud; Van Chien, Ho; Heong, K. L.; Escalada, Monina; Marquez, Leonardo; Thanh Truong, Dao; Villareal, Sylvia “Bong” y Settele, Josef

- (2015), "Land cover-based ecosystem service assessment of irrigated rice cropping systems in southeast Asia-an explorative study", *Ecosystem Services*, vol. 14, Ámsterdam, Holanda, Elsevier, pp. 76-87.
- Calderón-Contreras, Rafael y Quiroz-Rosas, Laura Elisa (2017), "Analysing scale, quality and diversity of green infrastructure and the provision of Urban Ecosystem Services: a case from Mexico City", *Ecosystem services*, vol. 23, Ámsterdam, Holanda, Elsevier, pp.127-137.
- Canclini, Néstor García; Castellanos, Alejandro y Rosas Mantecón, Ana (1996), *La ciudad de los viajeros: travesías e imaginarios urbanos, México, 1940-2000*, Ciudad de México, México, Grijalbo.
- Cepal (Comisión Económica para América Latina y el Caribe) (2014), *Panorama Social de América Latina 2014*, Santiago de Chile, Chile, Cepal.
- Conagua (Comisión Nacional del Agua) (2016), *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado*, Ciudad de México, México, Conagua.
- Cheng, Jianquan; Masser, Ian y Ottens, Henk (2003), "Understanding urban growth systems: theories and methods", paper 8099, Sendai, Japan, Researchgate.
- Chou, Jyh-Rong (2013), "A weighted linear combination ranking technique for multi-criteria decision analysis", *South African Journal of Economic and Management Sciences*, 16 (5), Cape Town, South Africa, University of Pretoria, pp. 28-41.
- Costanza, Robert; De Groot, Rudolf; Braat, Leon; Kubiszewski, Ida; Fioramonti, Lorenzo; Sutton, Paul; Farber, Steve y Grasso, Mónica (2017), "Twenty years of ecosystem services: how far have we come and how far do we still need to go?", *Ecosystem Services*, vol. 28, Ámsterdam, Holanda, Elsevier, pp. 1-16.
- Cuervo-Robayo, Angela Patricia; Téllez-Valdés, Oswaldo; Gómez-Albores, Miguel Ángel; Venegas-Barrera, Crystian Sadiel; Manjarrez, Javier y Martínez-Meyer, Enrique (2014), "An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico", *International Journal of Climatology*, 34 (7), Praga, República Checa, Royal Meteorological Society, pp. 2427-2437.

- De Alba, Felipe Murrieta y Guerrero Hernández, Natalia (2017), “Capítulo 3. La megalópolis como el mundo de los procesos en desborde”, en Felipe De Alba, (coord.), *Las Paradojas de la Megalópolis, un debate actual a distintas voces*, Ciudad de México, México, Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública, pp. 41-74.
- De Groot, Rudolf; Fisher, Brendan; Christie, Mike; Aronson, James; Braat, Leon; Gowdy, John; Haines-Young, Roy; Maltby, Edward; Neuville, Aude; Polasky, Stephen; Portela, Rosimeiry; e Ring, Irene (2010), “Integrating the ecological and economic dimensions in biodiversity and ecosystem service valuation”, en Kumar Pushpam (ed.), *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations*, Londres, Inglaterra, Earthscan, 40 pp.
- De Groot, Rudolf; Wilson, Matthew y Boumans, Roelof (2002), “A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services”, *Ecological Economics*, 41 (3), Boston, Estados Unidos de América, International Society for Ecological Economics, pp. 393-408.
- Delgado, Javier (2003), “La urbanización difusa, arquetipo territorial de la ciudad-región”, *Sociológica México*, núm. 51, Ciudad de México, México, Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco, pp. 13-48.
- Delgado, Martha (2016), “¿Cómo se gobierna la megalópolis? Pacto Climático Global de Ciudades”, conferencia presentada en el Segundo Coloquio Internacional Las paradojas de la megalópolis. Gobernar el aire, el agua y el territorio, 25 y 26 de julio, Ciudad de México, México, Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública, LXIII Legislatura, Cámara de Diputados-Palacio Legislativo de San Lázaro.
- Dimitrova, Anna; Hollan, Katarina; Laster, Daphne; Reinstaller, Andreas; Schratzenstaller, Margit; Walterskirchen, Ewald y Weiss, Teresa (2013), “Literature review on fundamental concepts and definitions, objectives and policy goals as well as instruments relevant for socio-ecological transition”, document de trabajo núm. 40, Viena, Austria, Welfare Wealth Work For Europe.
- Dobbs, Cynnamon; Hernández-Moreno, Ángela; Reyes-Paecke, Sonia y Miranda, Marcelo (2018), “Exploring temporal dynamics of

urban ecosystem services in Latin America: the case of Bogota (Colombia) and Santiago (Chile)”, *Ecological Indicators*, vol. 85, Coimbra, Portugal, Universidade de Coimbra, pp. 1068-1080.

Embid, Antonio y Martín, Liber (2017), *El nexo entre el agua, la energía y la alimentación en América Latina y el Caribe: planificación, marco normativo e identificación de interconexiones prioritarias*, núm. 179, Nueva York, Estados Unidos de América, Naciones Unidas Comisión Económica para América Latina y el Caribe.

Esse, Carlos; Valdivia, Paulo; Encina-Montoya, Francisco; Aguayo, Carlos; Guerrero Marcela y Figueroa, David (2014), “Modelo de análisis espacial multicriterio (AEMC) para el mapeo de servicios ecosistémicos en cuencas forestales del sur de Chile”, *Bosque*, 35 (3), Valdivia, Chile, Universidad Austral de Chile, pp. 289-299.

Fontana, Veronika; Radtke, Anna; Bossi Fedrigotti, Valérie; Tappeiner, Ulrike; Tasser, Erich; Buchholz Thomas y Zerbe, Stefan (2013), “Comparing land-use alternatives: Using the ecosystem services concept to define a multi-criteria decision analysis”, *Ecological Economics*, vol. 93, Boston, Estados Unidos de América, International Society for Ecological Economics, pp. 128-136.

Garrocho, Carlos y Juan Campos (2016), *Segregación socioespacial de la población mayor en la Ciudad de México: la dimensión desconocida del envejecimiento*, Toluca, México, El Colegio Mexiquense.

Garrocho, Carlos y Sobrino, Luis Jaime (2018), “Ciudades sostenibles en México: ¿qué hacer?”, en José Luis Lezama (coord.), *Cambio climático, ciudad y gestión ambiental*, Ciudad de México, México, El Colegio de México, pp. 201-246.

Garrocho, Carlos (2013), *Dinámica de las ciudades de México en el siglo XXI*, Ciudad de México, México, United Nations Population Fund-Consejo Nacional de Población-El Colegio Mexiquense.

Garza, Gustavo (2000), “Tendencias de las desigualdades urbanas y regionales en México, 1970-1996”, *Estudios Demográficos y Urbanos*, 489 (45), Ciudad de México, México, El Colegio de México, pp. 489-532.

- Garza, Gustavo y Schteingart, Martha (2010), *Los grandes problemas de México. Desarrollo urbano y regional. T-II. México*, Ciudad de México, México, El Colegio de México.
- GIZ e ICLEI (Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit e Consejo Internacional para las Iniciativas Ambientales Locales) (2014), *Operationalizing the Urban NEXUS: towards resource efficient and integrated cities and metropolitan regions*, Eschborn, Alemania, GIZ.
- Glaeser, Edward (2011), *Triumph of the city: How urban spaces make us human*, Hampshire, Inglaterra, Pan Macmillan.
- Gómez-Baggethun, Asa Gren, Erik; Barton, David; Langemeyer, Johannes; McPhearson, Timon; O'Farrell, Patrick; Andersson, Erik; Hamstead, Zoé y Kremer, Peleg (2013), "Urban ecosystem services", en Thomas Elmqvist, Michail Fragkias, Julie Goodness, Burak Güneralp, Peter J. Marcotullio, Robert I. McDonald, Susan Parnell, Maria Sendstad, Karen C. Seto y Cathy Wilkinson (eds.), *Urbanization, biodiversity and ecosystem services: Challenges and opportunities*, Dordrecht, Suiza, Springer, pp. 175-251.
- González-Ortiz, Felipe (2014), "La región del colibrí y su carnaval metropolitano", *Indiana*, vol. 31, Berlín, Alemania, Instituto Ibero-Americano, pp. 111-142.
- Gottmann, Jean (1961), *Megalopolis: the urbanized northeastern seaboard of the United States*, Nueva York, Estados Unidos de América, Twentieth Century Fund.
- Grunwald, Laura; Heusinger, Jannik y Weber, Stephan (2017), "A GIS-based mapping methodology of urban green roof ecosystem services applied to a Central European city", *Urban Forestry and Urban Greening*, vol. 22, Ámsterdam, Holanda, Elsevier, pp. 54-63.
- Haas, Jan y Ban, Yifang (2018), "Urban land cover and ecosystem service changes based on Sentinel-2A MSI and Landsat TM Data", *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11 (2), Mississippi, Estados Unidos de América, Mississippi State University, pp. 485-497.
- Haase, Dagmar; Larondelle, Neele; Andersson, Erik; Artmann, Martina; Borgström, Sara; Breuste, Jürgen; Gomez-Baggethun, Erik; Gren, Asa; Hamstead, Zoé; Hansen, Rieke; Kabisch, Nadja; Kremer,

- Peleg; Langemeyer, Johannes; Lorange Rall, Emily; McPhearson, Timon; Pauleit, Stephan; Qureshi, Salman; Schwarz, Nina; Voigt, Annette; Wurster, Daniel y Elmqvist, Thomas (2014), "A quantitative review of urban ecosystem service assessments: concepts, models, and implementation", *Ambio*, 43 (4), Estocolmo, Suecia, The Royal Swedish Academy of Sciences, pp. 413-433.
- Haase, Dagmar; Schwarz Nina; Strohbach, Michael; Kroll, Franziska y Seppelt, Ralf (2012), "Synergies, trade-offs, and losses of ecosystem services in urban regions: an integrated multiscale framework applied to the Leipzig-Halle Region, Germany", *Ecology and Society*, 17 (3), Estocolmo, Suecia, Resilience Alliance Inc., pp. 1-22
- Hauck, Jennifer; Görg, Christoph; Varjopuro, Riku; Ratamaki, Outi y Jax, Kurt (2013), "Benefits and limitations of the ecosystem services concept in environmental policy and decision making: Some stakeholder perspectives", *Environmental Science and Policy*, vol. 25, Ámsterdam, Holanda, Elsevier, pp. 13-21.
- Holt, Alison; Mears, Meghann; Maltby, Lorraine y Warren, Philip (2015), "Understanding spatial patterns in the production of multiple urban ecosystem services", *Ecosystem services*, vol. 16, Ámsterdam, Holanda, Elsevier, pp. 33-46.
- Hunt, Julian; Timoshkina, Yulia V.; Bohnenstengel, Sylvia I. y Belcher, Stephen (2013), "Implications of climate change for expanding cities worldwide", *Proceedings of the ICE-Urban Design and Planning*, 166 (4), Londres, Inglaterra, Institution of Civil Engineers, pp. 241-254.
- Ihlanfeldt, Keith Ray (1995), "The importance of the central city to the regional and national economy: a review of the arguments and empirical evidence", *Cityscape: A Journal of Policy Development and Research*, 1 (2), Washington, Estados Unidos de América, US Department of Housing and Urban Development, pp. 125-150.
- Lam, Sharon y Conway, Tenley (2018), "Ecosystem services in urban land use planning policies: A case study of Ontario municipalities", *Land Use Policy*, núm. 77, Ámsterdam, Holanda, Elsevier, pp. 641-651.

- Lang, Yanqing y Wei Song (2018), “Trade-off analysis of ecosystem services in a mountainous karst area, China”, *Water*, 10 (3), Basel, Suiza, MDPI, p. 300.
- Leese, Matthias y Simon, Meisch (2015), “Securitising sustainability? Questioning the water, energy and food-security nexus”, *Water Alternatives*, 8 (1), Montpellier, Francia, Water Alternatives Association, pp. 695-709.
- Lin, Shiwei; Wu, Ruidong; Yang, Feiling; Wang, Junjun y Wu, Wei (2018), “Spatial trade-offs and synergies among ecosystem services within a global biodiversity hotspot”, *Ecological Indicators*, vol. 84, Ámsterdam, Holanda, Elsevier, pp. 371-381.
- Marshall, Fiona; Dolley, Jonathan; Bisht, Ramila; Priya, Ritu; Waldman, Linda; Amerasinghe, Priyanie y Randhawa, Pritpal (2018), “Ecosystem services and poverty alleviation in urbanising contexts”, en Kate Schreckenberg, Geogina Mace y Mahesh Poudyal (eds), *Ecosystem services and poverty alleviation*, Nueva York, Estados Unidos de América, Routledge, pp. 137-151.
- Martín-López, Berta y Montes, Carlos (2011), *Biodiversidad y servicios de los ecosistemas. Observatorio de la Sostenibilidad en España (OSE)*, Alcalá de Henares, España, Universidad de Alcalá.
- McPhearson, Timon; Andersson, Erik; Elmqvist, Thomas y Frantzeskaki, Niki (2015), “Resilience of and through urban ecosystem services”, *Ecosystem Services*, vol. 12, Ámsterdam, Holanda, Elsevier, pp. 152-156.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment) (2005), *Ecosystems and human well-being: policy responses*, Washington, Estados Unidos de América, Island Press.
- Modigliani, Franco y Miller, Merton H. (1958), “The cost of capital, corporation finance and the theory of investment”, *The American Economic Review*, 48 (3), Tennessee, Estados Unidos de América, American Economic Association, pp. 261-297, <<http://www.his.se/PageFiles/17648/modiglianiandmiller1958.pdf>>, 10 de septiembre de 2018.
- Myers, Stewart Clay (1977), “Determinants of corporate borrowing”, *Journal of Financial Economics*, 5 (2), Ámsterdam, Holanda,

Elsevier, pp. 147-175, <<https://www2.bc.edu/~chemmanu/phdfin-corp/MF891%20papers/Myers%201977.pdf>>, 15 de agosto de 2018.

Nivón Bolán, Eduardo (2003), “Las contradicciones de la ciudad difusa”, *Alteridades*, 13 (26), Ciudad de México, México, Universidad Autónoma Metropolitana unidad Iztapalapa, pp. 15-33.

OMS (Organización Mundial de la Salud) (2005), *Guías de calidad del aire: actualización mundial 2005*, Ginebra, Suiza, OMS.

ONU (Organización de las Naciones Unidas) (2015), “Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development. A/RES/70/1”, resolución adoptada por la Asamblea General, 21 de octubre, Nueva York, Estados Unidos de América, ONU.

ONU-Hábitat (Organización de las Naciones Unidas-Hábitat) (2016a), “Índice de las ciudades prósperas en la república mexicana. City Prosperity Index, CPI. Reporte nacional de tendencias de la prosperidad urbana en México”, Ciudad de México, México, ONU-Hábitat, <<http://onuhabitat.org.mx/index.php/reportes-del-estado-de-las-ciudades-de-mexico-2016>>, 15 de agosto de 2018.

ONU-Hábitat (Organización de las Naciones Unidas-Hábitat) (2016b), *World cities report 2016. Urbanization and Development: emerging futures*, Nueva York, Estados Unidos de América, ONU.

ONU-Hábitat (Organización de las Naciones Unidas-Hábitat) (2013), *State of the world's cities 2012/2013: prosperity of cities*, Nueva York, Estados Unidos de América, Routledge.

Ordorica, Manuel (2006), “La demografía en los primeros años del siglo XXI: una visión hacia el proceso de envejecimiento”, *Papeles de Población*, 12 (50), Toluca, México, Universidad Autónoma del Estado de México, pp. 23-35.

Ostrom, Elinor (2009), “A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems”, *Science*, 325 (5939), Washington, Estados Unidos de América, American Association for the Advancement of Science, pp. 419-422.

- Oswald-Spring, Úrsula (2017), “Seguridad, disponibilidad y sustentabilidad energética en México”, *Revista Mexicana de Ciencias Políticas y Sociales*, 62 (230), Ciudad de México, México, Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 155-195.
- Outeiro, Luis y Sebastián Villasante (2013), “Sinergias y trade-offs de servicios ecosistémicos causados por la salmonicultura en el socioecosistema marino de Chiloé (Sur de Chile)”, *Sémata: Ciencias Sociais e Humanidades*, 25 (25), Santiago de Compostela, España, Universidad de Santiago de Compostela, pp. 153-177.
- Prévôt-Schapiro, Marie France (2001), “Fragmentación espacial y social: conceptos y realidades”, *Perfiles latinoamericanos*, núm. 19, Ciudad de México, México, Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, pp. 33-56.
- Quiroz-Rosas, Laura Elisa (2017), “Caracterización socioecológica en un espacio de transición entre lo rural y lo urbano del Estado de Morelos”, en Rafael Calderón-Contreras (coord.), *Los sistemas socioecológicos y su resiliencia: casos de estudio*, Ciudad de México, México, Universidad Autónoma Metropolitana-Gedisa.
- Rodríguez, Jon Paul; Beard, Douglas; Bennett, Elena; Cumming, Graeme; Cork, Steven; Agard, John; Dobson, Andrew y Peterson, Garry (2006), “Trade-offs across space, time, and ecosystem services”, *Ecology and Society*, 11 (1), Estocolmo, Suecia, Resilience Alliance Inc., pp. 28.
- Rosique-Cañas, José Antonio (2010), “Desafíos de la gestión metropolitana: megalópolis fragmentadas y gobernabilidad territorial”, en Eibenschutz Hartman (coord.), *La Zona Metropolitana del Valle de México: los retos de la megalópolis, pensar el futuro de México*, Ciudad de México, México, Universidad Autónoma Metropolitana.
- Sedesol-Conapo-Inegi (Secretaría de Desarrollo Social-Consejo Nacional de Población-Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2012), *Delimitación de las Zonas Metropolitanas de México 2010*, Ciudad de México, México, Sedesol-Conapo-Inegi.
- Sedatu-Conapo-Inegi (Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano-Consejo Nacional de Población-Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2018), *Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015*, Ciudad de México, México, Sedatu-Conapo-Inegi.

- Sepúlveda, Sergio (2008), *Gestión del desarrollo sostenible en territorios rurales: métodos para la planificación*, San José, Costa Rica, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Shao, Min; Tang, Xiaoyan; Zhang, Yuanhang y Li, Wenjun (2006), “City clusters in China: air and surface water pollution”, *Frontiers in Ecology and the Environment*, 4 (7), Washington, Estados Unidos de América, Ecological Society of America. pp. 353-361.
- Sobrino, Jaime (2003), “Zonas Metropolitanas de México en 2000: conformación territorial y movilidad de la población ocupada”, *Estudios Demográficos y Urbanos*, 18 (3), Ciudad de México, México, El Colegio de México, pp. 461–507, <www.jstor.org/stable/40315162>, 24 de julio de 2018.
- Sobrino, Luis Jaime; Garrocho, Carlos; Graizbord Boris; Brambila, Carlos y Aguilar Guillermo, Adrián (2015), *Sustainable cities: a conceptual and operational proposal*, Ciudad de Panamá, Panamá, United Nations Population Fund.
- Storper, Michael (2013), *Keys to the city: how economics, institutions, social interaction, and politics shape development*, Nueva Jersey, Estados Unidos de América, Princeton University Press.
- Szumacher, Iwona y Malinowska, Ewa (2013), “Servicios ecosistémicos urbanos según el modelo de Varsovia”, *Revista del CESLA*, núm. 16, Varsovia, Polonia, Universidad de Varsovia, pp. 81-108.
- TEEB (2011), *TEEB Manual for cities: ecosystem services in urban management*, Ginebra, Suiza, The Economics of Ecosystems and Biodiversity.
- Turner, Katrine Grace; Anderson, Sharolyn; Gonzales-Chang, Mauricio; Costanza, Robert; Courville, Sasha; Dalgaard, Tommy; Dominati, Estelle; Kubiszewski, Ida; Ogilvy, Sue; Porfirio, Luciana; Ratna, Nazmun; Sandhu, Harpinder; Sutton, Paul; Svenning, Jens-Christian; Turner, Mark Graham; Varennes, Yann-David; Voinov, Alexey y Wratten, Stephen (2016), “A review of methods, data, and models to assess changes in the value of ecosystem services from land degradation and restoration”, *Ecological Modelling*, vol. 319, Ámsterdam, Holanda, Elsevier, pp. 190-207.

UNEP (United Nations Environment Programme) (2016), *UNEP frontiers 2016 report: emerging issues of environmental concern*, Nairobi, Kenya, UNEP.

Vilchis-Mata, Iván; Garrocho, Carlos y Díaz-Delgado, Carlos (2018), “Modelo dinámico adaptativo para la toma de decisiones sostenibles en el ciclo hidrosocial urbano en México”, *Revista de Geografía Norte Grande*, núm. 71, Santiago de Chile, Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile, en prensa.

WEF (World Economic Forum) (2018), *The global risks report 2018*, Génova, Italia, WEF.

Wegner, Giulia y Pascual, Unai (2011), “Cost-benefit analysis in the context of ecosystem services for human well-being: A multidisciplinary critique”, *Global Environmental Change*, 21 (2), Ámsterdam, Holanda, Elsevier, pp. 492-504.

Wilches-Chaux, Gustavo (1993), “La vulnerabilidad global”, en Andrew Maskrey (comp.), *Los desastres no son naturales*, Bogotá, Colombia, Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, pp. 9-50.

Recibido: 15 de noviembre de 2018

Reenviado: 21 de enero de 2019

Aceptado: 12 de febrero de 2019

Iván Vilchis Mata. Doctor en Ciencias del Agua por la Universidad Autónoma del Estado de México, catedrático Conacyt adscrito al proyecto denominado: Ciencias sociales espacial y temporalmente integradas para el estudio de las ciudades (INTEGRA) de El Colegio Mexiquense, A.C., es profesor en la Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México. Su línea de investigación actual corresponde al estudio integral de ciudades desde la perspectiva socioambiental. Entre sus más recientes publicaciones destacan: “Modelo dinámico adaptativo para la toma de decisiones sostenibles en el ciclo hidrosocial urbano en México”, *Revista de geografía Norte Grande*, núm. 71, Santiago de Chile, Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile-Instituto de Geografía, pp. 59-90 (2018) y “Comportamiento termopluiométrico en la zona metropolitana de Toluca: el deterioro ambiental de las ciudades”, *Sociedad y Ambiente*, núm. 18, Chiapas, México, El Colegio de la Frontera Sur, pp. 145-173 (2018).