Nº 73, enero-junio de 2020, pp. 147-169.
ISSN: 0213-4691. eISSN: 1989-9890.
DOI: 10.14198/INGEO2020.HGAMCVCA

Investigaciones Geográficas
Instituto Interuniversitario de Geografía
Universidad de Alicante

**Cita bibliográfica:** De Las Heras Gutiérrez, D., Adame Martínez, S., Cadena Vargas, E.G., & Campos Alanís, J. (2020). Análisis espacial del Índice de Sustentabilidad Ambiental Urbana en la Megalópolis de México. *Investigaciones Geográficas,* (73), 147-169. https://doi.org/10.14198/INGEO2020.HGAMCVCA

# Análisis espacial del Índice de Sustentabilidad Ambiental Urbana en la Megalópolis de México

## *Spatial Analysis of the Urban Environmental Sustainability Index in the Megalopolis of Mexico City*

**Daniel De Las Heras Gutiérrez**[1*]
**Salvador Adame Martínez**[2]
**Edel Gilberto Cadena Vargas**[3]
**Juan Campos Alanís**[4]

## Resumen

La sustentabilidad ambiental urbana implica alcanzar cualitativamente un nivel medioambiental, socioeconómico, e institucional que permita el funcionamiento equilibrado de la ciudad a largo plazo. Es por ello, que su análisis es relevante en las ciudades, que concentran la mayoría de la población mundial y donde se desarrollan actividades económicas y sociales fundamentales, y que presentan, así mismo, problemáticas ambientales. La detección del patrón espacial y distribución de la sustentabilidad es de interés para investigadores y agentes políticos y sociales para la comprensión del fenómeno y para su posible solución al facilitar la delimitación y caracterización de aquellas áreas de la ciudad menos sustentables. Se elaboró el Índice de Sustentabilidad Ambiental Urbana con 35 indicadores que comprenden las tres dimensiones de sustentabilidad, aplicando técnicas de análisis espacial (autocorrelación espacial, análisis de cluster) en la Megalópolis de México. Se validó el índice, detectando una desigual distribución de los niveles de sustentabilidad , decreciente de municipios centrales a exteriores en cada zona metropolitana, una asociación espacial positiva significativa y existencia de clústeres, de elevada sustentabilidad en los centros metropolitanos conurbados y de baja sustentabilidad en zonas periféricas. Se plantea la aplicación de técnicas de análisis de correlación espacial de tipo bivariado para detección de posibles factores explicativos de sustentabilidad en posteriores estudios.

**Palabras clave:** Análisis espacial; Sustentabilidad urbana; Megalópolis; Índice de Sustentabilidad Ambiental Urbana; Indicadores; Clúster.

## Abstract

Urban environmental sustainability implies qualitatively reaching an environmental, socioeconomic, and institutional level that enables the balanced long-term operation of a city. This analysis is relevant given that cities concentrate the majority of the world's population and are the home of fundamental economic and social activities – and that cities also suffer environmental problems. The detection of a spatial pattern and distribution of sustainability is of interest to researchers and political and social agents for understanding the phenomenon and its possible solution by facilitating the delimitation and

1 Universidad Autónoma del Estado de México, México. leninakan-1@hotmail.com.* Autor para correspondencia.
2 Colegio de Postgraduados y Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Planeación Territorial- FaPUR-UAEM, Universidad Autónoma del Estado de México, México. adame_ms@yahoo.com
3 Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México, México. edelcadena@yahoo.com.mx
4 Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Geografía. Universidad Autónoma del Estado de México, México. jcamposa@uaemex.mx

**Recepción:** 09/09/2019. **Aceptación:** 13/03/2020. **Publicación:** 23/06/2020 (***in press***: 18/05/2020).

Este trabajo se publica bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional.

characterisation of the least sustainable areas of a city. The Urban Environmental Sustainability Index was prepared with 35 indicators that cover the three dimensions of sustainability, and apply spatial analysis techniques (spatial autocorrelation and cluster analysis) to the megalopolis of Mexico City. The index was validated and revealed an unequal distribution of levels of sustainability that decreased from central to exterior municipalities. A significant positive spatial association and clusters of high sustainability in the metropolitan centres and low sustainability in peripheral areas was found. The application of spatial correlation analysis techniques of the bivariate type is proposed to detect possible explanatory factors for sustainability in subsequent studies.

**Keywords:** spatial analysis; urban sustainability; megalopolis; urban environmental sustainability index; indicators; cluster.

## 1. Introducción

Dentro de las problemáticas ambientales, el desarrollo urbano sustentable busca aminorar los efectos perjudiciales de la urbanización acelerada y del modo de producción predominante sobre el medio y las sociedades que habitan el mismo. En los últimos años, más de la mitad de la humanidad habita en espacios urbanos (51,46% en 2010), de ahí la importancia de las implicaciones medioambientales del fenómeno urbano en la actualidad, además de que es un proceso que se ha incrementado las últimas décadas: 33,56% en 1960; 39,28% en 1980; 46,53% en 2000 y 53,84% en 2015 (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2018). Por otra parte no presenta un comportamiento idéntico en todo el mundo, ya que, en particular, en Iberoamérica la tasa de urbanización ascendió de un 49,28% en 1960 a un 79,82% en 2015, por comparación en Europa y la Comunidad de Estados Independientes (CEI) la tasa se incrementó de un 55,39% en 1960 un 70,87% en 2015, en tanto que en América Anglosajona de un 69,92% a un 81,64%, respectivamente (ONU, 2018).

El crecimiento de la población urbana en Iberoamérica no se ha traducido en una mejora de las condiciones de vida de sus moradores (Sánchez González, 2012). Las ciudades en Iberoamérica, en general, constituyen sistemas complejos e interdependientes, en donde los desequilibrios ambientales, económicos y sociales han implicado la generación de barreras para el desarrollo sustentable de las mismas (Martínez Peralta, 2016).

Así pues, actualmente las ciudades concentran un elevado porcentaje de la población y de la actividad económica. Es por ello que la sustentabilidad urbana es fundamental para lograr una tendencia de desarrollo conveniente para generaciones presentes y futuras.

El concepto de sustentabilidad abarca diferentes componentes urbanos que transcienden lo ambiental e incluyen variables culturales, políticas, institucionales, sociales y económicas. Esta visión ha implicado el desarrollo de metodologías que contemplen el estudio de las ciudades como sistemas holísticos complejos. La aproximación interdisciplinaria pude aportar una comprensión cualitativa y cuantitativa de los problemas de desarrollo y gestión urbana (Imaz, Ayala y Beristain, 2014).

En la literatura especializada en español, se emplean indistintamente los términos sostenible y sustentable; desarrollo sostenible y desarrollo sustentable; sostenibilidad y sustentabilidad (Cortés y Peña, 2015). Méndez (2012), indica que ambos términos no presentan mayor diferenciación con respecto a su aplicación al desarrollo, sin embargo, la diferencia concierne al lugar donde se utilice el término, siempre y cuando no se modifique su objetivo principal: satisfacer las necesidades de la generación presente sin comprometer las de las generaciones futuras.

La sustentabilidad urbana puede definirse como el alcanzar cualitativamente un nivel socioeconómico, demográfico y tecnológico que permita mantener el funcionamiento de la ciudad en el largo plazo (Graizbord, 2002). Es en este sentido que una nueva perspectiva de la ciudad debe cambiar su modelo tradicional para mantener una calidad ambiental urbana con una visión de futuro, misma que se puede considerar que está en proceso de construcción. El estudio de la sustentabilidad urbana permite elaborar propuestas en torno a diversas problemáticas ambientales territoriales, facilita diagnosticar la condición urbana, sus recursos naturales, el tipo de desarrollo, el impacto ambiental, económico y social igual que la posible participación de los diversos actores sociales (Moreno Sánchez, 2013).

La ciudad ambientalmente sustentable se caracteriza por configurarse como un sistema holístico en el cual los diferentes aspectos sociales, económicos, ambientales e institucionales se encuentran armonizados integralmente. Se parte de la idea que una ciudad está compuesta por subsistemas interrelacionados e interdependientes (Ruiz, 2012).

Si bien existen diversas propuestas metodológicas para medir la sustentabilidad a través de indicadores urbanos e índices resumen de los mismos, sin embargo, los trabajos de investigación desde un punto de vista espacial son escasos en la temática. Aunque el número de indicadores empleados en los estudios ambientales de carácter urbano es variable, existen dimensiones a las cuales se adscriben todos ellos, características sociales, económicas, ambientales y gubernativas.

El Banco Interamericano de Desarrollo (BID) establece tres desafíos a tener en cuenta en la cuantificación de la sustentabilidad urbana: Riesgo de desastres y cambio climático (gestión del medio ambiente y consumo de recursos naturales; mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes;reducción de la vulnerabilidad ante amenazas naturales); Sustentabilidad Urbana (Uso del suelo; Ordenamiento territorial; desigualdad urbana; movilidad y transporte; competitividad económica, empleo y conectividad; educación; seguridad y salud); gestión fiscal, gobernabilidad y transparencia evalúa los mecanismos adecuados de gobierno, la gestión adecuada de los ingresos, gastos y deuda pública. Las tres dimensiones propuestas por el BID son de carácter Ambiental, Socio-económico y Gubernativo-Financiero, respectivamente (BID, 2011).

Existen trabajos en los que el análisis del desarrollo sustentable urbano incorpora elementos ecológicos, económicos y sociales (BID 2011; BID, 2013; Mori y Christodoulou, 2012; Shen y Guo, 2014). Estos tres elementos se traducen en tres dimensiones que fueron utilizados en la propuesta de Torres Tovar, Adame Martínez y Campos Alanís, (2014) para la medición de la sustentabilidad en la Zona Metropolitana de Toluca, con un total de 54 indicadores.

En cambio otros autores como Torre Jofré (2009) establecen cuatro dimensiones: Habitabilidad, Equidad, Competitividad y Gobernanza. Sin embargo, en la práctica engloban idénticos aspectos: la dimensión de Habitabilidad se correspondería con las dimensiones Ambiental y Socio-económica del BID, la dimensión de Equidad con la Socio-económica y en tanto que las dos últimas, Competitividad y Gobernanza quedarían englobadas en la dimensión de Gestión fiscal, gobernabilidad y transparencia propuesta por el BID.

En la actualidad ya existe una experiencia internacional en elaborar índices de sustentabilidad urbana. Siemens, Corporate Kinghts y General Electric (Instituto Mexicano para la Competitividad [IMCO], 2014) han elaborado índices de ciudades sustentables y *verdes*. El Índice Verde de Siemens, aplicado a 17 ciudades de Iberoamérica, evalúa y mide el desempeño ambiental de las ciudades a través de las siguientes variables: energía; emisiones de $CO_2$, uso de tierra y edificios, transporte, residuos urbanos, agua, saneamiento, calidad de aire y Gobernanza Ambiental.

El Índice de Ciudades Sustentables de General Electric (*Forum for the Future*) promueve un panorama sustentable, alentando una competencia sana de discusión y sugerencias. Se aplicó en las 20 mayores ciudades del Reino Unido a tenor de las siguientes variables: calidad del aire, biodiversidad, residuos domésticos, huella ecológica, empleo, acceso al transporte, educación, salud, espacios verdes, cambio climático, economía y reciclaje.

Un tercer caso es el de Corporate Knights cuyo índice pretende determinar cómo se desempeña una ciudad comparada con otra en cuanto a sustentabilidad. Se aplicó en 20 ciudades de Estados Unidos de América con los siguientes sub-índices: calidad del medio ambiente, seguridad económica, gobernabilidad y empoderamiento, infraestructura y energía y finalmente, bienestar social.

En Iberoamérica también se han elaborado indicadores de sustentabilidad ambiental urbana, como es el caso de Colombia (Andrade Medina y Bermúdez Cárdenas, 2010) con la finalidad de realizar un diagnóstico de los 10 principales centros urbanos del país. Estos indicadores (un total de 20) fueron englobados en tres factores: sociales y económicos, territoriales y urbanísticos y en tercer lugar, ambientales.

Más concretamente, en México se ha creado un índice de ciudades competitivas y sustentables, aunque con una finalidad descriptiva y generalizada. Se trata de un trabajo conjunto del Banco Nacional de México S.A. (BANAMEX), el Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos, S.N.C. (BANOBRAS), el Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores, (INFONAVIT) el Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente, A.C. (CMM), y el Instituto Mexicano para la Competitividad, A.C. (IMCO). Este índice se traduce en un listado de las principales ciudades de México —un total de 79 para el año 2014— con un puntaje calculado para cada una de ellas en una serie de sub-indicadores de competitividad y sustentabilidad, en particular, en lo tocante a la sustentabilidad se tienen en cuenta los siguientes sub-índices: uso del agua, calidad del aire, disponibilidad de áreas verdes, manejo de residuos sólidos urbanos y uso de energía. (BANAMEX, BANOBRAS, INFONAVIT, 2014).

En Argentina se ha aplicado el análisis espacial en estudios ambientales urbanos (Zulaica y Celemín, 2008; Zulaica y Ferraro, 2012; Zulaica, 2013) mediante la elaboración de un Índice de Calidad de Vida Socioambiental (ICVSA), en la ciudad de Mar del Plata. En este estudio se emplean los Radios Censales como unidad de referencia espacial, y el índice es una integración de indicadores tanto sociales como ambientales. El análisis de los mismos se agruparon en cinco dimensiones: educación, salud, condición habitacional, pobreza y ambiente, y se aplica la Autocorrelación como técnica de análisis espacial.

En Chile existen estudios ambientales de carácter urbano igualmente con enfoque espacial (Escobar, 2006), que contemplan índices ambientales —en este caso Índice de Calidad Ambiental, ICA— como una variable latente explicada por un conjunto de indicadores ambientales simples que lo determinan.

Shen y Guo (2014) aplicaron técnicas geomáticas y análisis de patrones espaciales de sustentabilidad ambiental urbana por medio de la generación de un índice a partir de una jerarquización de indicadores ambientales que pudiese ser empleado como herramienta de medición, utilizado su metodología en un estudio de caso para la ciudad canadiense de Saskatoon.

Okumus y Edelman (2015) realizaron un análisis de sustentabilidad urbana en la ciudad estadounidense de Cincinatti diviendo el espacio de la ciudad en anillos y aplicando técnicas de análisis de Clúster buscando detectar los patrones espaciales intraurbanos del fenómeno.

El presente trabajo tiene por objeto el análisis espacial de la sustentabilidad ambiental urbana de la megalópolis del centro de México mediante la creación de un Índice de Sustentabilidad Ambiental Urbana (ISAU) a partir de tres subíndices que contemplen las tres dimensiones de la sustentabilidad (Riesgo de desastres, cambio climático y calidad medioambiental; desarrollo urbano integral y una tercera de gestión fiscal, gobernabilidad y transparencia). Estos subíndices son producto a su vez de la elaboración de 35 indicadores, seleccionados en razón de su disponibilidad a nivel infraestatal y siguiendo las orientaciones del Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2011). El nivel de desagregación del estudio son los municipios y alcaldías[5] de la megalópolis, ya que el objetivo principal del estudio es indagar en la existencia de desigualdades en niveles de sustentabilidad ambiental dentro de lamisma, además de delimitar y definir las áreas más desfavorecidas al respecto.

Entre la tipología de espacios urbanos por su complejidad y magnitud destacan las megalópolis, se trata de ciudades con funciones globales que se han convertido en enormes regiones urbanas policéntricas (Martínez, 2015). El término fue empleado por primera vez en 1957 (Gottman, 1957), y aunque su definición viene determinada por múltiples factores (volumen demográfico, extensión o densidad, entre otros), en México se han especificado características adicionales, las cuales se ajustan al modelo de la megalópolis mexicana: un complejo urbano y policéntrico, resultado de un proceso histórico determinado por su contexto geográfico y articulado a partir de la concentración de distintas áreas urbanas, producto de una absorción geográfica de territorios. Así mismo, que cuenta con características simbólicas basadas en su arquitectura singular y cuya complejidad urbana constituye un referente de centralidad cultural (Rivas *et al*, 2006).Los índices resumen como el ISAU se configuran como instrumentos que, sumados al uso del análisis espacial cuantitativo facilitan el acceso a la complejidad del territorio y al manejo de un número creciente de datos estadísticos; son herramientas esenciales para la identificación de áreas de homogeneidad relativa, con similitud de factores positivos o adversos en sustentabilidad ambiental.

Los subíndices e ISAU, se crearon a través del Método de Componentes Principales (MCP) a partir de 35 indicadores cuantitativos especializados, con la finalidad de detectar diferencias territoriales y el grado de relación existente entre las unidades espaciales analizadas en especial, las zonas con menor sustentabilidad ambiental y que, por tanto, puedan requerir acciones correctivas más urgentes.

Se aportaron en este trabajo varios aspectos innovadores; en primer lugar el análisis espacial de la sustentabilidad ambiental urbana en una megalópolis, representando una primera perspectiva de las dinámicas espaciales internas del fenómeno de la sustentabilidad en este tipo de estructuras urbanas. Así mismo, a partir de fuentes de datos públicas y abiertas, se construyeron indicadores significativos a partir de los propuestos por el BID, lo cual permite afirmar la posibilidad de realizar ulteriores estudios de áreas metropolitanas de México y dando la posibilidad de establecer estudios comparativos entre las mismas. Del mismo modo, se ha podido demostrar la existencia de diferencias internas significativas en niveles de sustentabilidad ambiental urbana en la Megalópolis del Centro de México y determinar claramente aquellos espacios más desfavorecidos y necesitados de intervención.

5 La alcaldía es el órgano político administrativo de cada demarcación territorial de la Ciudad de México, que han substituído a las antiguas delegaciones en 2018 (Gaceta Oficial de Ciudad de México de 4 de mayo de 2018).

## 2. Metodología

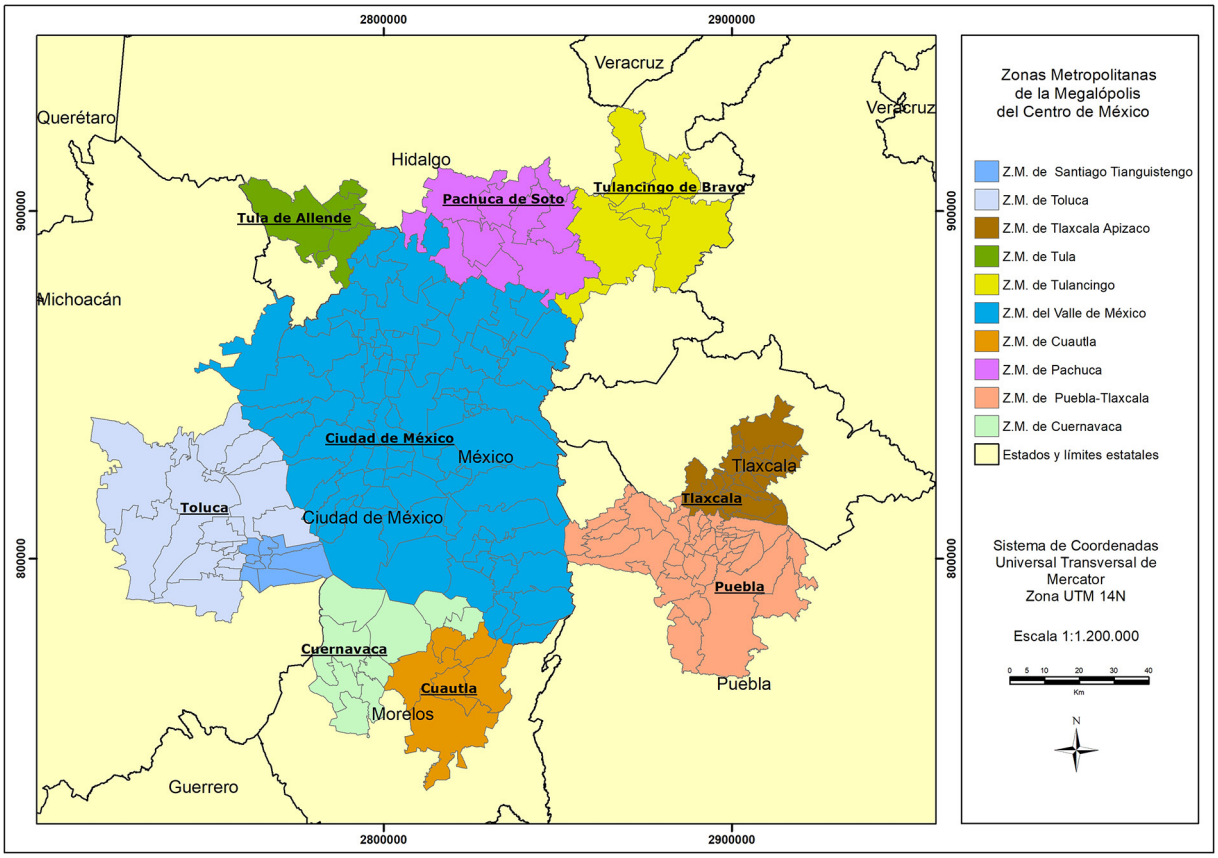
### *2.1. Delimitación y caracterización de la zona de estudio*

La Megalópolis del Centro de México se definió legalmente por vez primera en 1996 (Diario Oficial de la Federación [DOF], 1996) como un área que comprende los municipios correspondientes a las zonas metropolitanas de las capitales de los estados limítrofes al Valle de México, así como la totalidad de los municipios que mantienen una relación funcional estrecha con la Ciudad de México y los que se ubican entre las zonas metropolitanas que integran la corona regional de ciudades y el Distrito Federal (en la actualidad, Ciudad de México), además de las alcaldías de la Ciudad de México (en el momento de definición de la Megalópolis, delegaciones del Distrito Federal).

La megalópolis de México inició su conformación en la década de los 80 del siglo pasado (Garza, 2010). La Megalópolis del Centro de México se delimitó y definió en el subsistema urbano del centro de México en torno a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, recibiendo también la denominación de Corona Regional del Centro de México, que engloba un total de 189 municipios.

Esta megalópolis es de tipo polinuclear por la existencia de varios centros y subcentros (Garza, 2010), los municipios centrales[6] de cada una de las zonas metropolitanas y una serie de núcleos urbanos independientes (DOF, 1996) como son Tepotzotlán, Huehuetoca y Zumpango; Pirámides, Nopaltepec y Texcoco; y finalmente, Chalco y Amecameca.

Figura 1. Delimitación de Zonas Metropolitanas de la Megalópolis del Centro de México




Fuente: Marco Geoestadístico de INEGI (2010a) y de Delimitación de las Zonas Metropolitanas de México 2010 (Consejo Nacional de Población [CONAPO], 2012a). Elaboración propia

6 Los municipios centrales son aquellos donde se localiza la ciudad principal que da origen a la zona metropolitana y que pueden hallarse conurbados con uno o más municipios vecinos, o integrada física o funcionalmente. Los municipios exteriores son contiguos a los anteriores pero no conurbados a pesar de que manifiesten un carácter predominantemente urbano (Secretaria de Desarrollo Social [SEDESOL], Consejo Nacional de Población [CONAPO] e Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI], 2012).

En la Figura 1 se observan los límites y municipios de las siguientes zonas metropolitanas constitutivas de la megalópolis: Valle de México; Valle de Toluca y Santiago Tianguistengo; Puebla-Tlaxcala; Cuernavaca; Cuautla; Pachuca-Tlaxcala y Tula-Tulancingo (DOF, 1996). Su extensión y volumen demográfico exponen gran heterogeneidad (Tabla 1). Globalmente la población ascendió a 27.777.019 habitantes en el último Censo de Población yVivienda (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI], 2011a) y ocupando una superficie de 18.841 kilómetros cuadrados. Esta megalópolis se ajusta al concepto de ciudad-región, ello implica la no continuidad física entre las distintas zonas metropolitanas que las conforman. Del mismo modo, al incorporar municipios periféricos situados entre diferentes zonas metropolitanas se evidencia la existencia de municipios no conurbados o con un carácter urbano menos consolidado (Connolly y Cruz, 2004).

Este espacio megalopolitano mantiene un peso desporporcionado sobre la dinámica económica a nivel nacional. Según datos del Censo Económico de 2009, nueve alcaldías de la Ciudad de México aportan por sí mismas el 17,7% del PIB nacional, seguido del Estado de México, con un 9,2%. Al considerar el total aportado por las seis entidades que la componen supone un 33,3 % del PIB nacional.

Tabla 1. Zonas Metropolitanas de la Megalópolis del Centro de México. Superficie y población

| Zona Metropolitana | Total de Municipios | Superficie (km²) | Porcentaje de Superficie sobre total | Población Total (2010) | Porcentaje de Población sobre total |
|---|---|---|---|---|---|
| Cuautla | 6 | 978,84 | 5,2 | 434.147 | 1,56 |
| Cuernavaca | 9 | 1118,36 | 5,92 | 893.508 | 3,22 |
| Pachuca | 9 | 1403,29 | 7,45 | 205.812 | 1,93 |
| Puebla-Tlaxcala | 37 | 2052,72 | 10,87 | 2.633.275 | 9,48 |
| Santiago Tianguistengo | 6 | 303,16 | 1,61 | 157.944 | 0,57 |
| Tlaxcala-Apizaco | 19 | 707,63 | 3,76 | 499.567 | 1,79 |
| Toluca | 16 | 2410,05 | 12,79 | 2.014.091 | 7,25 |
| Tula | 5 | 590,92 | 3,13 | 537.078 | 0,74 |
| Tulancingo | 6 | 1416,85 | 7,52 | 284.755 | 1,02 |
| Valle de México | 76 | 7859,91 | 41,72 | 20.116.842 | 72,42 |
| Total Megalópolis | 189 | 18.841,73 | 100 | 27.777.019 | 100 |

Fuente: Marco Geoestadístico Municipal (AGEM) (INEGI, 2010a) y Censo de Población y Vivienda de 2010 (INEGI, 2011a). Elaboración propia

Históricamente la Megalópolis del Centro de México se ha configurado como eje estructurador del territorio y la actividad económica nacional. El nivel de participación en el Producto Interior Bruto Nacional (PIB) supone un 33,3% (INEGI, 2009), además de la concentración de un tercio de la población del país, lo cual alude a un patrón altamente centralizado y concentrado.

Esta megalópolis se presenta como uno de los sistemas territoriales más complejos a nivel mundial: la Zona Metropolitana del Valle de México, a cuyo alrededor crecen bajo el mismo patrón de ocupación dispersa del territorio, y concentración económica y demográfica, otras zonas metropolitanas de importancia como Toluca , Puebla-Tlaxcala, Tlaxcala-Apizaco, Cuernavaca, Cuautla, Tula, Tulancingo, Pachuca y Tianguistenco.

El conjunto de estas ciudades, a través de interacciones funcionales determinan condiciones de uso no racional de los recursos naturales y energéticos, imponen costos económicos y sociales a los sectores productivos y a la población, y determinan vacíos para la gobernabilidad de espacios y situaciones que no corresponden a los niveles de gobierno actualmente existentes.

## *2.2. Procesamiento de datos*

Los indicadores que se emplean en este trabajo contemplan una serie de temáticas de sustentabilidad (Tablas 2, 3 y 4) agrupadas en las tres dimensiones de las que se compone (Riesgo de desastres, cambio climático y calidad medioambiental; desarrollo urbano integral y una tercera de gestión fiscal, gobernabilidad y transparencia). En base a estas tres dimensiones se agruparon los indicadores en subíndices

con los que calcular el ISAU. No obstante es preciso reconocer que existe una importante limitante en la disponibilidad real de datos, sobre todo al tener que tratarse en un nivel de desagregación a escala municipal. A través de bases de datos de instituciones públicas mexicanas diversas como el INEGI, la Comisión Nacional del Agua, CONAGUA, el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social, CONEVAL, el Sistema Nacional de Información del Agua, SINA y el Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire, SINAICA, se han recopilado datos adecuados para elaborar 35 indicadores. De la Dimensión I ambiental 15 indicadores; de la Dimensión II socioeconómica 17 indicadores; en tanto que de la Dimensión III financiero-gubernativa, tres (Tablas 2, 3 y 4).

Tabla 2. Indicadores de la Dimensión I: Riesgo de desastres, cambio climático y calidad medioambiental

| **Temáticas de sustentabilidad ambiental y cambio climático** | **Indicador** | **Unidades** | **Fuente** |
|---|---|---|---|
| I. Agua | 1. Cobertura de Agua | Porcentaje de Viviendas con agua potable | INEGI, 2011a |
| | 2. Disponibilidad de recursos hídricos | Volumen concesionado de agua (metros cúbicos) por habitante | CONAGUA, 2012 |
| | 3. Concentración de contaminantes en las aguas superficiales | Nivel de Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO5 | CONAGUA, 2012 |
| | 4. Cobertura de Alcantarillado | Porcentaje de Viviendas con sistema de drenaje | INEGI, 2011a |
| II. Saneamiento y Alcantarillado | 5. Tratamiento de aguas residuales | Existencia de Instalación de Tratamiento de aguas residuales en el término municipal | CONAGUA, 2012 |
| | 5. Efectividad del alcantarillado | Capacidad de tratamiento de aguas residuales (metros cúbicos) respecto al volumen concesionado | CONAGUA, 2012 |
| III. Gestión de residuos sólidos | 6. Cobertura de recolección de residuos sólidos | Existencia se Servicio de recolección de residuos sólidos urbanos | INEGI, 2011a |
| | 7. Eliminación final adecuada de residuos sólidos | Existencia de Servicio de Tratamiento de residuos sólidos urbanos | INEGI, 2011a |
| IV. Energía | 8. Cobertura energética | Porcentaje de Viviendas con suministro de energía eléctrica | INEGI, 2011a |
| V. Calidad del Aire | 9. Control de la calidad del aire | Existencia de estaciones de monitoreo en el municipio | SEMARNAT-SINAICA |
| | 10. Concentración de contaminantes en el aire | Porcentaje de días anuales con niveles de contaminantes superiores a los valores recomendados | SEMARNAT-SINAICA |
| VI. Mitigación del cambio climático | 11. Sistemas de medición de emisiones de gases de efecto invernadero | Existencia de estaciones de monitoreo en el municipio | SEMARNAT-SINAICA |
| | 12. Emisiones de gases de efecto invernadero totales | Porcentaje de días anuales con niveles de emisiones superiores a los valores recomendados | SEMARNAT-SINAICA |
| | 13. Planes y objetivos de mitigación | Existencia de Planes y objetivos de mitigación | INE, 2012 |
| VII. Vulnerabilidad ante desastres naturales | 14. Sensibilidad ante desastres naturales | Riesgo de Inundación a nivel municipal | CENAPRED, 2010 |

Fuente: Censo de Población y Vivienda de 2010 (INEGI, 2011a); Índice de peligro por inundaciones a nivel municipal (CENAPRED, 2010); Atlas Digital del Agua. México 2012 (CONAGUA, 2012); El medio ambiente en México, 2013-2014 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT, 2014]; Dirección General del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental (SINAICA, 2010); Instituto Nacional de Ecología (INE, 2012). Elaboración propia

Tabla 3. Indicadores de la Dimensión II: Desarrollo Urbano Integral

| Temáticas de Sustentabilidad de desarrollo urbano integral | Indicador | Unidades | Fuente |
|---|---|---|---|
| I. Uso del Suelo/ Ordenamiento del territorio | 1. Densidad | Habitantes por kilómetro cuadrado | INEGI, 2011a |
| | 2. Vivienda | Número de personas por vivienda particular habitada (Hacinamiento) | INEGI, 2011a |
| | 3. Áreas verdes y de recreación | Superficie de áreas verdes por habitante (metros cuadrados/habitante) | INEGI, 2011b |
| II. Desigualdad urbana | 4. Pobreza | Porcentaje de población en situación de pobreza | CONEVAL, 2011 |
| | 5. Segregación socioespacial | Índice de segregación | Elaboración propia |
| | 6. Desigualdad de ingresos | Coeficiente de GINI | CONEVAL, 2011 |
| III. Movilidad/Transporte | 7. Seguridad vial | Víctimas de accidentes de tráfico por 100.000 habitantes | INEGI, 2011a |
| IV. Competitividad de la economía | 8. Producto bruto | Valor Agregado Bruto Censal/habitante | INEGI, 2011a |
| V. Empleo | 9. Desempleo | Porcentaje de Desocupada sobre la PEA | INEGI, 2011a |
| | 10. Empleo informal | Porcentaje de Población Subempleada sobre la PEA | INEGI, 2011a |
| VI. Conectividad | 11. Internet | Porcentaje de Viviendas particulares habitadas con servicio de internet | INEGI, 2011a |
| | 12. Telefonía | Porcentaje de Viviendas particulares habitadas con servicio de telefonía | INEGI, 2011a |
| VII. Educación | 13. Calidad Educativa | Promedio académico por centros a nivel municipal | INEE, 2015 |
| | 14. Asistencia escolar | Porcentaje de población de entre 3 y 14 años que asiste a la escuela | INEGI, 2011a |
| | 15. Educación superior | Porcentaje de población de 18 años y más con educación post-básica | INEGI, 2011a |
| VIII. Seguridad | 16. Violencia | Número de delitos por cada 100.000 habitantes | INEGI, 2011a |
| IX. Salud | 17. Provisión de servicios de salud | Porcentaje de Población Derechohabiente | INEGI, 2011a |

Fuente: Censo de Población y Vivienda de 2010 (INEGI, 2011a); Cartografía geoestadística urbana, Censos Económicos 2009 (INEGI, 2011b); Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL, 2011); Instituto Nacional para la Evaluación de la Educación (INEE, 2015). Elaboración propia

Esta selección de variables, inspirada por las propuestas del BID, establece que las urbes iberoamericanas padecen de un crecimiento acelerado que implica una serie de desafíos para su sustentabilidad futura:

a) Dimensión I: Riesgo de desastres, cambio climático y calidad medioambiental.
Abarca la gestión del medio ambiente y consumo de recursos naturales (calidad y contaminación de las aguas, consumo de agua, eficiencia de uso, tratamiento de aguas residuales, gestión de residuos sólidos, eficiencia energética) así como mitigación de los gases de efecto invernadero (GEI) y otras formas de contaminación (control de calidad y contaminación del aire, emisiones de gases efecto invernadero).

b) Dimensión II: Desarrollo Urbano Integral.
Incluye el control del crecimiento y mejora del hábitat humano (densidad constructiva y demográfica, calidad de vivienda, disponibilidad de áreas verdes y de recreo, así como desigualdad urbana —segregación, marginación, inequidad de ingreso—); la Promoción del transporte urbano sustentable

(seguridad vial); la Promoción del desarrollo económico local competitivo y sustentable (PIB, desempleo, empleo informal, además cuestiones de conectividad —acceso a internet y telefonía—) y la provisión de servicios sociales de alto nivel y promoción de la cohesión social (aspectos de educación y seguridad).

c) Dimensión III: Gestión fiscal, gobernabilidad y transparencia
Dimensión de sustentabilidad fiscal y gobernabilidad, existen datos a nivel municipal de únicamente dos aspectos, impuestos y deuda pública.

Tabla 4. Indicadores de la Dimensión III: Gestión fiscal, gobernabilidad y transparencia

| Gestión fiscal, gobernabilidad y transparencia | Indicador | Unidades | Fuente |
|---|---|---|---|
| I. Impuestos y autonomía | 1. Ingresos e impuestos municipales | Indicador calculado mediante el índice de Autonomía Financiera | INEGI, 2010b, 2011a y Barcelata Chávez, 2015 |
| II. Gestión del gasto | 2. Calidad del gasto público | Indicador calculado mediante el índice de gasto público municipal | INEGI, 2010a y Barcelata Chávez, 2015 |
| III. Deuda | 3. Sustentabilidad de la deuda municipal | Servicio de la Deuda respecto al Balance Primario | INEGI 2010b, 2011b y ASF 2012 |

Fuente: Censo de Población y Vivienda de 2010 (INEGI, 2011a); Estadística de finanzas públicas estatales y municipales de 2010 (INEGI, 2010b); Auditoría Superior de la Federación (ASF, 2012); Barcelata Chávez (2015). Elaboración propia

Las fuentes identificadas son de carácter público en su totalidad. En el caso de la Dimensión I, los datos proceden del Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (Calidad del aire, contaminación atmosférica y emisión de gases de efecto invernadero); de CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) para la calidad y contaminación de las aguas, consumo municipal, eficiencia de uso, tratamiento de aguas residuales, cobertura de drenaje, calidad del servicio, así como cartografía base de agua (Subgerencia de Información Geográfica del Agua, dependiente de CONAGUA).

El periodo de análisis comprende 2010 a 2015 debido a la disponibilidad de datos con los que elaborar los indicadores. En su mayoría de los indicadores (23) fueron construidos total o parcialmente (dos de la dimensión III, Tabla 4) a partir de datos del Marco Geoestadístico Básico, de la Estadística de Finanzas Públicas estatales y municipales, del Censo de Población y Vivienda de 2010, Cartografía Geoestadística Urbana y del Índice de peligro por inundaciones a nivel municipal (CENAPRED, 2010; INEGI 2010a; INEGI 2010 b; INEGI, 2011a e INEGI, 2011b), todos ellos construidoscon datos de 2010.

No obstante, para la elaboración completa de 10 indicadores y parcial de otros dos (Tabla 4) se recurrió a datos comprendidos al periodo 2010-2015, como en el caso de 4 indicadores de temáticas de agua y saneamiento de la dimensión de Riesgo de desastres, cambio climático y calidad medioambiental, que se crearon con datos del Atlas Digital del Agua de México de 2012 (CONAGUA, 2012) o cuatro de los indicadores de calidad del aire y mitigación del cambio climático, producto del registro de la emisión de los gases de efecto invernadero entre 2010 y 2015 en un total de 75 estaciones repartidas a lo largo de la zona de estudio. Los indicadores *Planes y objetivos de mitigación* (Dimensión I, Tabla 2) y *Calidad Educativa* (Dimensión II, Tabla 3) del Instituto Nacional de Ecología (INE, 2012) y del Instituto Nacional para la Evaluación de la Educación (INEE, 2015) respectivamente, solo pudieron calcularse con datos de 2012 y 2015. Del año 2015 proceden insumos parciales con los que calcular los indicadores *Ingresos e Impuestos Municipales* y *Calidad del Gasto público* (Tabla 4).

## *2.3. Elaboración de Subíndices e Índice de Sustentabilidad Ambiental Urbana*

Se construyó el Índice de Sustentabilidad Ambiental Urbana (ISAU) a partir de 35 indicadores agrupados en tres dimensiones, cada una de estas correspondiendo a respectivos subíndices: el Subíndice de la Dimensión I se compone a su vez de dos subíndices, uno con 8 indicadores numéricos y el otro con 7 indicadores de tipo nominal. Con los tres subíndices se calculó a su vez el ISAU. Tanto los Subíndices como el ISAU se elaboraron con la técnica del Análisis de Componentes Principales (ACP).

El ACP se trata de una técnica matemática que permite explorar la estructura subyacente de los datos y re-expresar los datos originales en pocas dimensiones que captan la mayor varianza posible de una com-

binación lineal de las variables originales. En este sentido, el Método de Componentes Principales permite estudiar las relaciones que existen entre las variables cuantitativas, sin considerar a priori, ninguna estructura, ni de variables, ni de individuos (Olivares, 2014). El ACP reduce la dimensión original, permitiendo una visión más sencilla del fenómeno, en su aplicación genera un nuevo conjunto de variables con las que se puede recuperar tanto la multidimensionalidad conceptual del fenómeno de la sustentabilidad ambiental urbana , como contar con un índice (primera componente) resumen del fenómeno, es decir, el ISAU, para cada uno de los municipios y alcaldías de la zona de estudio (CONAPO, 2012b).

Se decidió no otorgar una ponderación diferenciada a los 35 indicadores, a fin de evitar la arbitrariedad que en cierto modo existe en el otorgamiento de pesos diferentes con ciertas metodologías.

El cálculo de los componentes principales depende de las unidades de medida empleadas en las variables. Es por tanto importante, antes de aplicar el ACP, estandarizar las variables para que tengan media 0 y desviación estándar 1, ya que, de lo contrario, las variables con mayor varianza dominarían al resto. Seguidamente los indicadores fueron agrupados según su Dimensión para el cálculo inicial de Subíndices, con la siguiente disposición:

- Subíndice Dimensión I

Este subíndice es el único que cuenta con dos tipos de indicadores, 8 de tipo numérico y 7 de tipo binario (Ausencia=0 y Presencia=1). Con los indicadores de tipo numérico se llevó a cabo su estandarización y ACP. En cambio con los siete indicadores de ausencia/presencia, se calculó su subíndice de forma diferente, en el software IBM SPSS 24 con la siguiente fórmula:

Subíndice Dimensión Ib= [(Tratamiento de aguas residuales + Cobertura de recolección de residuos sólidos + Eliminación final adecuada de residuos sólidos + Control de la calidad del aire + Sistemas de medición de emisiones de gases de efecto invernadero + Planes y objetivos de mitigación + Sensibilidad ante desastres naturales)/7]*100

Seguidamente se procedió a re-escalar el primer subíndice (obtenido de los indicadores numéricos) en un rango de 0 a 100 y mediante el ACP se obtuvo el Subíndice de la Dimensión I. A su vez este último fue igualmente re-escalado.

- Subíndice Dimensión II

Esta dimensión (Desarrollo Urbano Integral) consta de 17 indicadores, los cuales fueron estandarizados y se aplicó el ACP. Una vez aplicado el ACP fue re-escalado de 0 a 100.

- Subíndice Dimensión III

Esta dimensión (Gestión fiscal, gobernabilidad y transparencia) consta de 3 indicadores, al igual que en los subíndices anteriores fueron estandarizados y se aplicó el MCP. Una vez aplicado el MCP será re-escalado de 0 a 100.

La validación de los subíndices y del ISAU se comprobó con la obtención de una Varianza Total Explicada superior a 50 en el segundo componente en todos ellos.

La validación del ISAU y de los tres subíndices se comprobó con la obtención de una Varianza Total Explicada superior a 50 en el segundo componente (Hinojosa, Garrocho, Campos y Campero, 2015) en todos ellos: Varianza Total Explicada en segundo componente del Subíndice Dimensión I: Riesgo de desastres, cambio climático y calidad medioambiental-50,18%; Varianza Total Explicada en segundo componente del Subíndice Dimensión II: Desarrollo Urbano Integral-55,67%; Varianza Total Explicada en segundo componente del Subíndice Dimensión III: Gestión fiscal, gobernabilidad y transparencia-71,45%. La Varianza Total Explicada obtenida en el segundo componente en el Índice de Sustentabilidad Ambiental Urbana (ISAU) fue de 89,04%.

Finalmente el ISAU fue re-escalado en un rango de 0 a 100, estableciéndose seis niveles de sustentabilidad según el puntaje obtenido para cada unidad espacial en el índice: Muy Baja (ISAUI= 0-16,667); Baja (16,668-33,333); Media-Baja (33,334-50); Media-Alta (50,001-66,667); Alta (66,668-83,333) y Muy Alta (83,334-100). Se estratificó por criterio de intervalos equivalentes, consistente en dividir el rango de valores de atributo en sub-rangos de igual tamaño.

### *2.4. Técnicas de análisis espacial*

El Análisis Exploratorio de Datos Espaciales (AEDE) es un conjunto de técnicas estadísticas creadas para detectar patrones y tendencias en los datos, y poder así formular hipótesis sobre los mismos (Her-

nández, 2015). Estas técnicas describen y visualizan distribuciones espaciales, como el agrupamiento y dispersión de fenómenos en el territorio.

El AEDE ofrece grandes posibilidades en el análisis de fenómenos con dimensión espacial sobre todo en ausencia de un marco formal o teoría previa acerca del fenómeno analizado, ello ocurre con frecuencia en ciencias sociales, cuando se analizan grandes bases de datos geográficos cuya distribución no se conoce a priori, como es el caso del patrón espacial de la sustentabilidad ambiental urbana en un espacio tan complejo como el de una megalópolis (Chasco, 2006). El AEDE crea una interfaz que facilita el estudio de la información geográfica, permitiendo descubrir patrones y anomalías en los datos que de otro modo no serían aparentes, así como resultados interpretables que permiten al investigador evitar conclusiones superficiales y erróneas sobre el fenómeno (Celemín, 2009).

A través del análisis espacial se indaga en el descubrimiento de la estructura ambiental urbana por medio de un análisis de autocorrelación espacial denominado Índice Global de Moran, que permite detectar zonas de configuraciones ambientales diferenciadas y un acercamiento al grado de inequidad al considerar la asociación existente entre las unidades espaciales en relación al ISAU. Es decir, el análisis del Índice Global de Moran permite descubrir si se cumple la hipótesis de que cierta variable (ISAU) tiene una distribución aleatoria o si, por el contrario, existe asociación significativa de valores similares o no similares entre zonas vecinas (Gómez, Prieto, Mellado y Moreno, 2015).

Por medio del Índice Global de Moran y del Índice de Autocorrelación Espacial Local de Moran se puede estimar el grado de concentración espacial de la sustentabilidad ambiental urbana, identificar clústeres de elevada y baja sustentabilidad ambiental dentro de la megalópolis, y analizar la heterogeneidad u homogeneidad según el ISAU en la Megalópolis del Centro de México. En este trabajo se empleó el Sistema de Información Geográfica ArcMap 10.2 y la herramienta de software gratuita GeoDa.

Mediante el análisis de datos, se pretende registrar la correlación que una misma variable tiene en diferentes unidades espaciales vecinas, existiendo alguna de las siguientes posibilidades (Zulaica y Celemín, 2009):

- Autocorrelación espacial positiva: las unidades espaciales contiguas muestran valores similares. Indica una tendencia al agrupamiento de las unidades espaciales.
- Autocorrelación espacial negativa: las unidades espaciales vecinas presentan valores muy disparejos. Indica una tendencia a la dispersión de las unidades espaciales
- Sin Autocorrelación: no se presenta ninguno de los casos anteriores. Los valores de las unidades espaciales vecinas tienen valores producidos aleatoriamente

El Índice Global de Moran es una medida geográfica-estadística que indica el grado de correlación entre valores de unidades territoriales. El valor de este índice oscila entre -1 y 1; los valores negativos indican un conglomerado espacial de unidades territoriales con valores de análisis distintos y los valores positivos indican un conglomerado espacial de unidades territoriales con valores de análisis similares, sean altos o bajos. Los tendientes a -1 indicarían autocorrelación negativa y los tendientes a 1 nos indicarían el máximo de autocorrelación positiva. Los valores próximos a 0 indican la ausencia de correlación espacial entre los valores de análisis, es decir, la no existencia de un patrón definido. Se considera significativo cuando es mayor a 0,5 (Celemín, 2009).

El índice Global de Moran se expresa de la siguiente manera:

$$I = \frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{i=1}^{n} w_{ij}(y_i - y)(y_j - y)}{\left(\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - y\right)^2\right)\left(\sum_{i=1}\sum w_{ij}\right)}$$

Donde:

yi = Valor de la variable o atributo en cada unidad espacial analizada «i».
yj = Valor de la variable o atributo en cada unidad espacial vecina «j».
wij = Proximidad entre las unidades espaciales «i» y «j»(llamada también «matriz de pesos espaciales»).
n = Número de unidades espaciales

De la relación entre la variable y su rezago espacial es posible construir el diagrama de dispersión de Moran (Figura 2) que clasifica los valores en cuatro cuadrantes: en el cuadrante I o AA se concentran las

observaciones altas de la variable rodeadas de vecinos con similar característica, lo mismo para el III o BB, pero en este caso las observaciones corresponden a bajos valores de la variable. Por otro lado, en el cuadrante II o BA, se ubican los valores bajos de la variable en vecindario con características opuestas, y en el cuadrante IV o AB, se presenta el caso opuesto al cuadrante II; en este caso son altos valores de la variable rodeados de vecinos con bajos valores. En el diagrama de dispersión de Moran se estandariza la variable a analizar y se obtiene el retardo espacial de dicha variable estandarizada, representándose ambos valores en un eje cartesiano. El retardo espacial puede definirse como una media aritmética simple de los valores de la variable en cuestión de las unidades espaciales limítrofes

La pendiente de la recta de regresión es el valor del estadístico Índice de Moran de autocorrelación espacial global, de forma que cuanto mayor sea el ángulo que forma esta con el eje de abscisas, más fuerte será el grado de autocorrelación espacial y viceversa (Sánchez Gamboa y Taddei Bringas, 2014).

Figura 2. Diagrama de dispersión de Moran

| WZ | | |
|---|---|---|
| | II (BA) | I (AA) |
| | III (BB) | IV (AB) |

Zt

Elaboración propia

El Índice Global de Moran se calculó partir de los resultados del Índice ISAU por medio del programa GeoDa. Se tuvo en cuenta que los *p-valores* fuesen inferiores a 0.05 y que de este modo los resultados fuesen significativos. La significancia en Geoda se calculó por el método de permutación (Lavado, 2015).

Así mismo, una asociación significativa puede no darse en toda la ciudad, sino solo en algunas zonas. Es por ello que tiene gran importancia recurrir a indicadores locales de asociación espacial, el Índice de Autocorrelación Espacial Local de Moran (en inglés LISA: Local Indicators of Spatial Association), que permiten tener una visión espacial de la sustentabilidad ambiental urbana, a diferencia del análisis del Índice Global de Moran por medio de lectura de gráfica sin una plasmación espacial (Martori y Hoberg, 2008).

Además de ello LISA tiene como objetivo que el estadístico obtenido para cada zona suministre información sobre la relevancia de valores similares alrededor de la misma (Anselin, 1995). Mediante su empleo se puede observar a simple vista la hipotética existencia de clústeres de determinadas características.

El Índice de Autocorrelación Espacial Local de Moran permite clasificar las unidades espaciales (municipios/alcaldías) de acuerdo con la relación de su Índice de Autocorrelación Espacial Local de Moran respecto a los valores registrados en las unidades espaciales vecinas en cinco categorías:

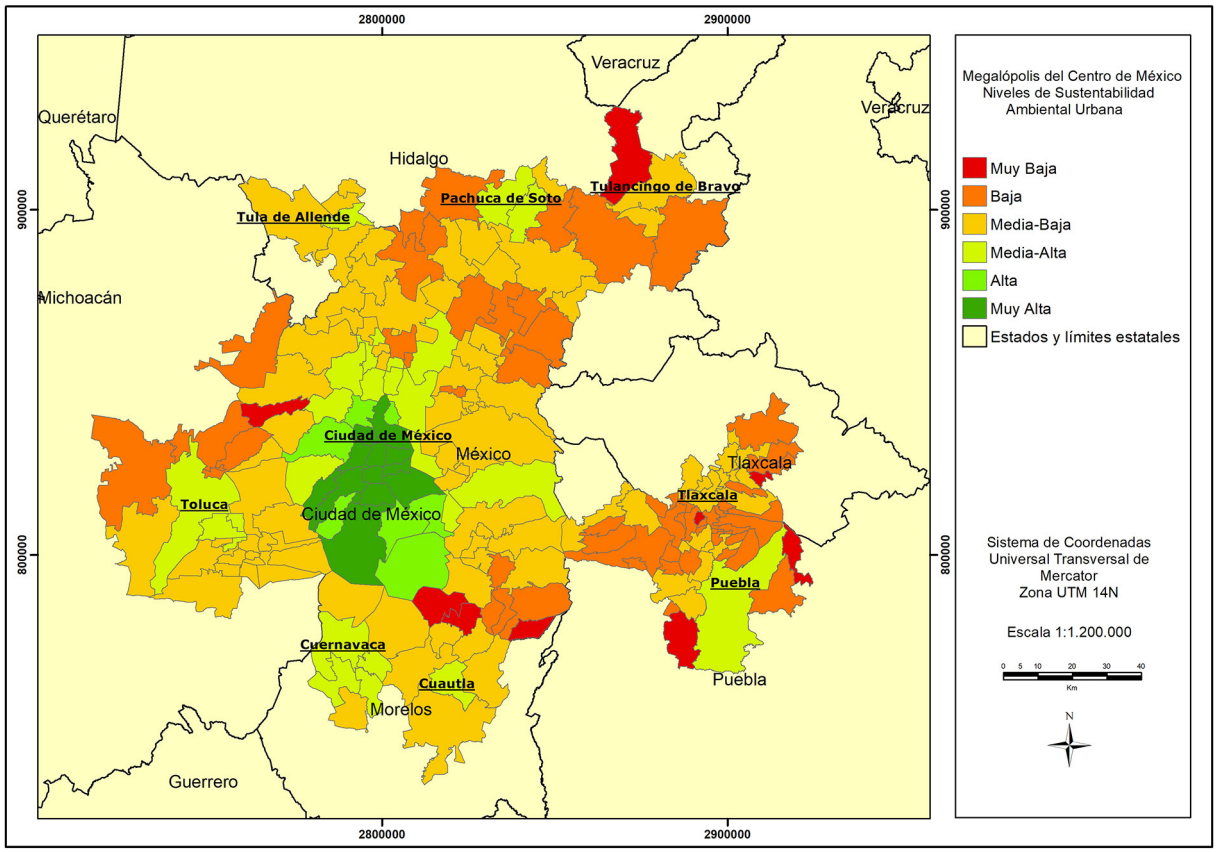
1. Bajo-Bajo Esta categoría se refiere a unidades espaciales con valores bajos del atributo en estudio (en nuestro estudio, Índice de Sustentabilidad Ambiental Urbana) que tengan como vecinas unidades espaciales que presenten igualmente valores bajos (serían zonas con segregación significativa de bajos niveles de Índice Sustentabilidad Ambiental Urbana).
2. Alto-Alto En esta categoría están unidades espaciales con valores altos de los atributos (Índice de Sustentabilidad Ambiental Urbana) bajo nuestro análisis, rodeadas de unidades espaciales que registren igualmente valores altos.
3. Bajo-Alto Se incluye en esta categoría a unidades espaciales con valores bajos del atributo en cuestión, rodeadas de unidades espaciales que registren en contraposición valores altos.
4. Alto-Bajo Son unidades espaciales con valores altos del atributo estudiado, rodeadas de unidades espaciales que registran valores bajos.
5. Estadísticamente No Significativo Esta categoría se refiere a unidades espaciales con valores estadísticamente no significativos y cuyos valores de segregación no se pueden determinar de manera confiable en términos estadísticos.

El Índice de Autocorrelación Espacial Local de Moran se calculó en el programa ArcMap 10.2 con el Índice de Sustentabilidad Ambiental Urbana.

## 3. Resultados

La Megalópolis del centro de México presenta unos niveles de sustentabilidad ambiental urbana muy desiguales en su interior (Figura 3), lo cual es comprensible dada su estructura polinuclear y su gran extensión territorial y volumen demográfico.

Figura 3. Niveles del Índice de Sustentabilidad Ambiental Urbana en la Megalópolis del Centro de México




Fuente: Marco Geoestadístico de INEGI (2010a). Elaboración propia

En 2010 la Megalópolis contaba con 27.777.019 habitantes, de los cuales 7.278.796 habitaban en municipios y alcaldías con niveles de sustentabilidad por debajo de 50, es decir, un 26,2% del total (Tabla 5). Así mismo, aquellas unidades con niveles de Muy Baja y Baja sustentabilidad sumaban un 5,48% del total demográfico, la nada despreciable cifra de 1.520.957 habitantes sobre prácticamente un 30% de la superficie total de la zona de estudio.

Tabla 5. Índice de Sustentabilidad Ambiental Urbana por municipios y alcaldías

| Nivel de Índice de Sustentabilidad Ambiental Urbana | Número de Municipios | Superficie total (kilómetros cuadrados) | Porcentaje de superficie sobre el total | Población Total (2010) | Porcentaje de Población sobre el total |
|---|---|---|---|---|---|
| Muy Alto | 12 | 932,24 | 4,95 | 7.706.140 | 27,74 |
| Alto | 6 | 799,28 | 4,24 | 2.642.914 | 9,52 |
| Medio-Alto | 24 | 3163,18 | 16,79 | 10.149.139 | 36,54 |
| Medio-Bajo | 85 | 8330,53 | 44,21 | 5.757.839 | 20,73 |
| Bajo | 53 | 4869,14 | 25,84 | 1.413.136 | 5,09 |
| Muy Bajo | 9 | 747,37 | 3,97 | 107.821 | 0,39 |
| Total Megalópolis | 189 | 18841,74 | 100 | 27.776.989 | 100 |

Fuente: Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2011a). Elaboración propia

En contraposición, las unidades espaciales con Muy Alta y Alta sustentabilidad eran escasas en número (18 de un total de 189) pero su peso demográfico era muy importante, 10.349.054 habitantes, es decir, el 39,27% de la población de la megalópolis.

El desequilibrio de peso numérico y demográfico entre municipios con Muy Alta-Alta y Muy Baja-Baja sustentabilidad (Figura 3) es evidente y viene determinado por el desigual tamaño demográfico de los mismos.

Las unidades espaciales (muncipios y alcaldías) con niveles de Muy Alta y Alta Sustentabilidad se concentran en su totalidad en la Ciudad de México y sus inmediaciones (alcaldías de Gustavo A. Madero, Azcapotzalco, Miguel Hidalgo, Cuauhtemoc, Venustiano Carranza, Iztacalco, Cuajimalpa de Morelos, Álvaro Obregón, Benito Juárez, Coyoacán, Iztapalapa y Tlalpan con Muy Alta sustentabilidad). Existe una notable diferencia entre la Ciudad de México y los núcleos de las zona metropolitanas de su corona en niveles de sustentabilidad, ya que estos son inferiores, con Media-Alta sustentabilidad, como ocurre en Puebla (ISAU de 59,85), Toluca-Metepec-Chapultepec (ISAU de 62,8 en el primer caso y 65,71y 50,98 respectivamente), Pachuca-Mineral de la Reforma (ISAU de 60,85 y 60,77), Cuernavaca-Temixco-Emiliano Zapata-Jiutepec (ISAU de 63,7, 51,49, 55,23 y 64,89 respectivamente) y Cuatla (ISAU de 52,12). Por otro lado, el caso de Tula de Allende, el municipio con sustentabilidad más elevada es el contiguo de Atitalaquia, con un ISAU de 53,65.

En cambio los municipios con Muy Baja y Baja sustentabilidad son aquellos periféricos de los núcleos metropolitanos de la corona de la Ciudad de México e intermedios entre los mismos, generalmente no conurbados, como se puede observar en la Figura 3 por los límites de las Ageb, así se comprueba al norte de Toluca con tres municipios con Baja sustentabilidad y un promedio de ISAU de 24,53 (Almoloya de Juárez, Temoaya y Otzolotepec), siete al nordeste (ISAU de 28,1) y siete al sudeste (ISAU de 16,9) de la Ciudad de México (entre otros, Textlalpan, Temascalapa, Axapusco, Otumba, Tezoyuca al nordeste y Ayapango, Ozumba y Tepetlixpa al sudeste), oeste y este de Pachuca de Soto (San Agustín Tlaxcala y Epazoyucan con un ISAU promedio de 31,6).

Excepciones significativas a este patrón, son los casos de los municipios centrales de Tulancingo de Bravo al nordeste de la megalópolis (Acatlán, Cuautepec de Hinojosa y Singuilucan) y un gran número de pequeños municipios situados en el este de la megalópolis, que forman un corredor conurbado entre Tlaxcala y Puebla como pueden ser Santa Isabel Xiloxoxtla, Santra Cruz Quilehtla, Santa Catarina Ayometla, San Lorenzo Axocomanitla, San Juan Huactzinco, San Jerónimo Zacualpan, La Magdalena Tlatelulco, Tetlatlahuca, Tepeyanco, Acuamanala de Miguel Hidalgo y Coronango con Muy Baja y Baja sustentabilidad en todos ellos y en las periferias conurbadas al norte, este y sur de los dos grandes núcleos de Tlaxcala y Puebla igualmente: Tetla de la Solidaridad, Xaloztoc, Tzompantepec, Huejotzingo, Teolocholco, Amozoc, Ocoyucan, entre otros.

El patrón general de la sustentabilidad ambiental urbana en la megalópolis del centro de México es de decrecimiento de los centros metropolitanos hacia las periferias no conurbadas, con algunas excepciones como en la zona metropolitana de Tula y en las de Puebla-Tlaxcala-Apizaco.

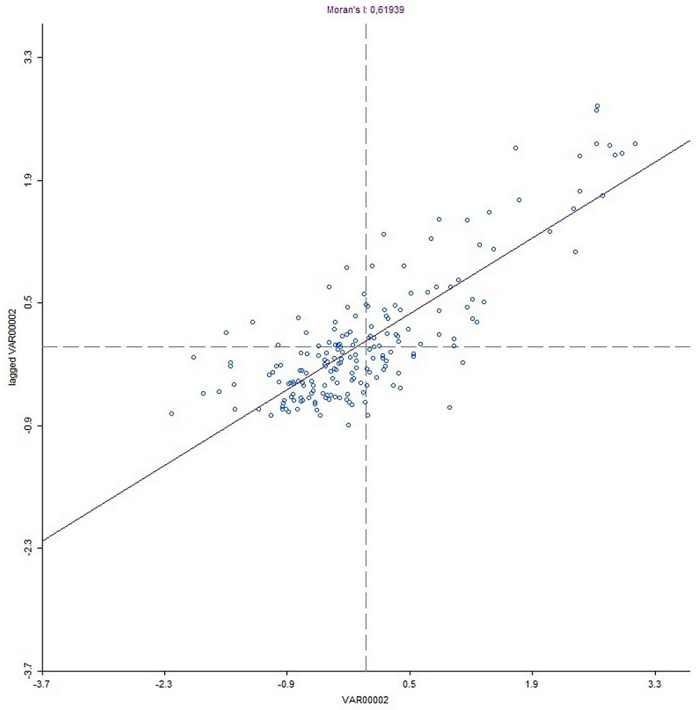
Una vez determinado el patrón espacial de la sustentabilidad ambiental urbana y la presencia de una importante heterogeneidad interna en niveles de la misma y una primera aproximación de áreas favorecidas y más desfavorecidas, es de interés comprobar si en la megalópolis existe asociación espacial estadísticamente significativa de la sustentabilidad.

Un primera aproximación al respecto la aporta el cálculo del Índice de Autocorrelación Global de Moran, que arrojó un valor de 0,619 (Figura 4), lo cual confirma la existencia de asociación espacial positiva significativa, es decir, la presencia en la zona de estudio de uno o varios conglomerados espaciales de unidades territoriales (municipios y alcaldías) con valores de sustentabilidad similares, ya sean altos o bajos. Un valor del índice como el obtenido y superior a 0,6 nos indica por una parte, que los niveles de sustentabilidad tienen una distribución en la megalópolis con un patrón no aleatorio (ello ocurría con valores próximos a cero) y que los niveles de sustentabilidad de cada unidad espacial están relacionados con los niveles de sustentabilidad de las unidades (municipios y alcaldías) vecinos.

En el diagrama de Moran (Figura 4) se puede apreciar como la pendiente de la recta de regresión tiene un notable ángulo en relación al eje de abscisas, lo cual es evidencia junto al valor del índice, de lo significativo de la autocorrelación existente. En el I y III cuadrantes aparecen los municipios y alcaldías con Índice de Sustentabilidad Ambiental Urbana superior e inferior a la media respectivamente y que están rodeadas

de unidades espaciales con de índices de sustentabilidad superiores e inferiores a la media de la megalópolis. Se corresponderían con clústeres de tipo Alto-Alto (Cuadrante I) y tipo Bajo-Bajo (Cuadrante III).

Figura 4. Diagrama de Dispersión de Moran. Índice de Sustentabilidad Ambiental Urbana




Elaboración propia

La megalópolis muestra una asociación espacial positiva y significativa en niveles de sustentabilidad ambiental urbana, para un análisis más profundo se dispone de la cartografía producto del Índice de Autocorrelación Espacial Local de Moran (Figura 5).

En la Tabla 6 se puede ver los cinco clústeres fundamentales existentes en la Megalópolis. En primer lugar destacar los dos clústeres de tipo Alto-Alto, uno preeminente de superficie, número de municipios y alcaldías y peso demográfico, que se extiende en torno a la Ciudad de México y de Toluca y en segundo lugar el conformado en torno a Cuernavaca y su vecino muncipio conurbado de Jiutepec. En el primer caso el clúster incluye las 16 alcaldías de la Ciudad de México y una serie de municipios conurbados de su periferia, ya administrativamente pertenecientes al estado de México: Valle de Chalco, Ixtapaluca, Nezahualcoyotl (municipio de gran volumen de población: 1.110.565 habitantes) al este; Ecatepec (igualmente muy poblado: 1.656.107 habtantes), Tlanepantla, Tecámac, Coacalco de Berriozábal, Tultitlán, Cuatitlán, Cuatitlán Izcalli al norte y Atizapán de Zaragoza, Naucalpan de Juárez, Huixquilucan y Cuajimalpa de Morelos al oeste. Al oeste de la Ciudad de México, en torno a Toluca (capital del estado de México: 819.561 habitantes) en dirección este, los municipios de Metepec, San Mateo Atenco y Chapultepec).

Tabla 6. Caracterización de los Clústeres de la Megalópolis del Centro de México

| Tipo de Clúster | Situación | Número de municipios | Población Total (2010) |
|---|---|---|---|
| Alto-Alto | Ciudad de México-Toluca | 34 | 17.742.094 |
| Alto-Alto | Cuernavaca | 2 | 562.121 |
| Alto-Bajo | Pachuca | 2 | 395.266 |
| Bajo-Alto | Periferia Ciudad de México | 15 | 485.418 |
| Bajo-Bajo | Clústeres en la periferia de Puebla y Tlaxcala | 39 | 738.085 |

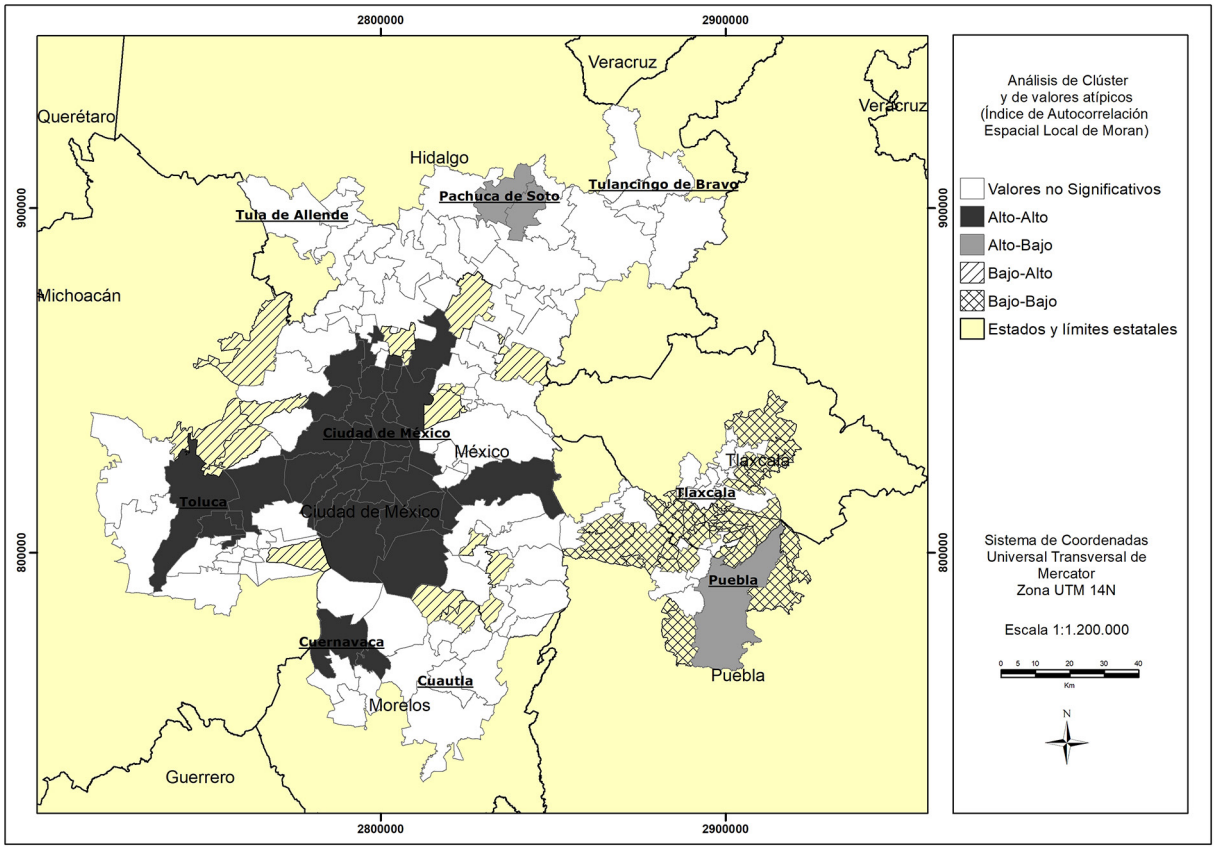
Fuente: Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2011a). Elaboración propia

Existen igualmente dos clústeres de tipo Alto-Bajo, uno al este de la megálopolis, conformado por el municipio de Puebla (capital estatal y cuarta ciudad mexicana más poblada con 1.434.052 habitantes) y otro al norte de la megalópolis, de Pachuca (capital estatal) y su vecino municipio conurbado de Mineral de la Reforma. Se trata pues, de grandes núcleos urbanos rodeados de espacios suburbanos, sobre todo en el caso de Puebla, con niveles de sustentabilidad Bajos y Muy Bajos.

Los clústeres de tipo Bajo-Alto se localizan fundamentalmente en torno al gran clúster de tipo Bajo-Bajo de Ciudad de México-Toluca, sobre todo al nordeste (Temascalapa, Nextlalpan, Otumba y Atenco), sudeste (Temamatla, Ayapango, Tepetlixpa, Totolapan y Tlanepantla) y al noroeste: Villa del Carbón, Isidro Fabela, Temoaya y Otzolotepec (estos dos últimos al norte de Toluca y con la particularidad prácticamente excepcional de que los dos primeros son municipios con población no urbana superior ligeramente al 50%).

Los clústeres de tipo Bajo-Bajo se encuentran, en tres grupos próximos entre sí, situados en torno a los centros metropolitanos de Puebla y Tlaxcala, en particular el conglomerado de pequeños municipios conurbados (un total de 28 municipios conforman este clúster con casi 460.000 habitantes, cuyos centros más importantes son Huehotzingo y San Pablo del Monte, ambos con casi 70.000 habitantes) situados entre ambas y que conforman un verdadero corredor urbanizado (Figuras 3 y 5), igualmente al nordeste de Tlaxcala (Tetla de la Solidaridad, Xaloztoc, Tocatlán, Tzompantepec, Coaxomulco, Santa Cruz Tlaxcala y Contla de Juan Cuamaztli) y al este (Tepatlaxco de Hidalgo y Amozoc) y sur de Puebla (Ocoyucan y San Gregorio Atzompa) aparecen más unidades como clústeres de tipo Bajo-Bajo.

Figura 5. Mapa de clústeres del Índice de Sustentabilidad Ambiental Urbana




Fuente: Marco Geoestadístico de INEGI (2010a). Elaboración propia

Gracias al análisis de clúster, se pudo obtener una delimitación nítida en la Megálopolis de México según sus niveles de sustentabilidad ambiental urbana (Figura 5), los agrupamientos de alcaldías y municipios con valores altos se sitúan en torno a los centros metropolitanos de Ciudad de México, Toluca, Tianguistengo y Cuernavaca (clústeres de tipo Alto-Alto), así como de Pachuca y Puebla, en estos casos, con la particularidad de contigüidad con municipios con valores bajos de sustentabilidad, y que en el

caso de Puebla y Tlaxcala se añade la presencia de clústeres de tipo Bajo-Bajo. Se confirma de este modo la presencia de agrupamientos de unidades espaciales con valores altos y bajos de sustentabilidad, y por lo tanto, la existencia de desequilibrios internos en la Megalópolis de México.

Del análisis de los resultados, de la distribución espacial de la sustentabilidad ambiental urbana, de la lectura de índice de Moran y su diagrama y del Índice de Autocorrelación Global de Moran y su cartografía se extraen las siguientes consideraciones:

Existe en la megalópolis una significativa heterogeneidad interna entre sus municipios y alcaldías según sus niveles de sustentabilidad, dándose sus niveles más elevados en las alcaldías de la Ciudad de México, municipios conurbados vecinos y en menor medida en los centros metropolitanos de Cuernavaca, Toluca, Puebla y Pachuca. En contrapartida los niveles bajos de sustentabilidad se encuentran en municipios no conurbados (con excepciones).

Se detectó la existencia de asociación espacial positiva significativa (superior a 0,6) de los municipios y alcaldías según sus niveles de sustentabilidad, lo cual aporta respaldo geoestadístico para afirmar la existencia de agrupamientos de unidades espaciales según sus niveles de sustentabilidad, es decir, de clústeres. Se han podido delimitar cinco clústeres principales en la megalópolis según sus niveles de sustentabilidad (Tabla 6) que confirman el patrón espacial de centros (clústeres de tipo Alto-Alto y Alto Bajo) metropolitanos con valores altos de sustentabilidad y periferias con valores de sustentabilidad bajos (clústeres de tipo Bajo-Bajo y Bajo-Alto), en particular en la periferia de la Ciudad de México y en las periferias de las zonas metropolitanas de Puebla y Tlaxcala (Figura 5).

Así pues, se puede afirmar que en cuestión de sustentabilidad ambiental urbana dentro de la megalópolis el patrón espacial fundamental es de disminución de los niveles de sustentabilidad de los núcleos metropolitanos (Ciudad de México, Puebla, Toluca, Cuernavaca, Pachuca fundamentalmente) y municipios vecinos conurbados hacia las periferias, fundamentalmente muncipios no conurbados (sí bien se trata de municipios en su inmensa mayoría con población eminentemente urbana, ya que únicamente 15 municipios del total de 189 de la zona de estudio tenían menos de un 50% de población urbana).

Si bien apenas algo más de un 26% (más de siete millones de habitantes) de la población de la megalópolis viven en espacios con niveles de sustentabilidad ambiental urbana por debajo de 50, no debe de llevar a engaño, ya que al tratarse los municipios y alcaldías con sustentabilidad superior a 50 de carácter más urbano y en general, con mayor volumen demográfico, suponen una escasa proporción de la superficie de la megalópolis, es decir, los municipios con niveles de sustentabilidad inferiores a 50 suponen casi tres cuartas partes del espacio megalopolitano (74,02%).

## 4. Discusión de resultados

Desde los años noventa del pasado siglo han aparecido numerosas propuestas de indicadores, sistemas de indicadores e índices para la medición y cuantificación de la sustentabilidad ambiental en espacios urbanos (IMCO, 2014; Torres, Adame y Campos, 2014). Mayoritariamente se trata de discusiones teóricas y en el caso de trabajos con finalidad de estudio de caso, son análisis sin preocupación espacial ni geo-estadística (Andrade Medina y Bermúdez Cárdenas, 2010). Entre otras propuestas, Siemens, Corporate Kinghts y General Electric (IMCO, 2014) presentaron índices de ciudades sustentables y verdes, aplicándolos a ciudades de Iberoamérica, Reino Unido y Estados Unidos de América.

En este trabajo, aplicado en un país Latinoamericano como es México, se siguió orientativamente para la elaboración de indicadores la propuesta ICES del BID, desarrollada entre 2012 y 2016 y aun cuando en la práctica de los 65 propuestos únicamente se pudieron construir 35 ante la inexistencia de datos, se ha demostrado la posibilidad de abarcar las tres dimensiones de la sustentabilidad ambiental urbana y la gran mayoría de las temáticas, con excepción de las temáticas de *gestión pública participativa*, *gestión pública moderna* y *transparencia*, todas ellas pertenecientes a la dimensión de Sustentabilidad fiscal y gobernabilidad. La propuesta aplicada aquí a la Megalópolis del Centro de México es susceptible de ser reproducida en cualquier área metropolitana mexicana o municipio de carácter urbano.

Es de interés comentar que propuestas como la de ICES de indicadores, a pesar de su intención de aplicación internacional no tiene en cuenta las posibilidades existentes en cada país, de modo que solo una parte de los indicadores propuestos pudieron ser elaborados ante la inexistencia de datos, algunos de los propuestos, sobre todo en las temáticas de Movilidad y Transporte y Competitividad de la economía son de difícil o subjetiva elaboración para el caso de México, (Hernández *et al*, 2017)

En comparación con otras investigaciones, como el Índice de ciudades competitivas y sustentables (BANAMEX, BANOBRAS, INFONAVIT, 2014), en este trabajo se rehusó a incluir indicadores de tipo subjetivo, en el mencionado índice de ciudades competitivas y sustentables elaborado para urbes mexicanas, a pesar de afirmarse de que el referido índice pudo ser calculado gracias a mejores fuentes de información y a nuevas tecnologías que permitieron el uso de fuentes no convencionales, en ningún momento se presenta adecuadamente la metodología de elaboración de subíndices de carácter tan subjetivos como sistema de derecho confiable y objetivo; sociedad preparada, incluyente y sana; sistema político estable y funcional o gobiernos eficientes y eficaces. Se rechazó el empleo de indicadores subjetivos ya que estos presentan un cierto carácter inestable (ya que percepciones y opiniones personales se originan más en consideraciones personales que en fenómenos concretos comprobables) y a que se dificulta la comparación entre diferentes casos de estudio dadas las diferentes conceptualizaciones que producen diferentes colectivos en relación a la percepción de una misma situación, como por ejemplo, con respecto a la inseguridad (Tonon, 2010; Veenhoven, 2000).

Los resultados obtenidos en esta investigación son coherentes con los de otros trabajos de elaboración de índices de sustentabilidad en espacios urbanos y aplicación de técnicas espacial, aun cuando las escalas de las zonas de estudio no fuesen idénticas, ya que es novedoso el análisis de una megalópolis desde esta perspectiva.

Entre los escasos trabajos de análisis espacial de sustentabilidad urbana, cabe destacar los trabajos sobre Mar del Plata en Argentina, Saskatoon en Canadá y Cincinatti en EEUU (Zulaica y Celemín, 2008; Shen y Guo, 2014; Okumuş y Edelman, 2015). Si bien se trata de ciudades de menor tamaño y población que la megalópolis de México (564.056, 246.376 y 296.945 habitantes respectivamente), en todos estos trabajos se realizó análisis exploratorio de datos espaciales (AEDE) como autocorrelación espacial y de clúster y apuntaron oportunamente lo idóneo de investigar los patrones espaciales de la sustentabilidad dentro del tejido urbano. En estos estudios se detectó la tendencia de decrecimiento de los niveles de sustentabilidad ambiental de los centros urbanos a las periferias periferias —si bien al tratarse de ciudades de países muy diferentes, la terminología varía, como radios censales en Argentina y Anillos en el caso de Cincinatti— . Como en el caso de la megalópolis la dicotomía es la mencionada de centro-periferia, siendo aquellas áreas suburbanas las que presentan menor sustentabilidad.

En la Megalópolis del Centro de México existe una mayor complejidad en la distribución de los niveles de sustentabilidad, en parte se explica por su estructura polinuclear jerárquica y por su gran extensión (cerca de 19.000 kilómetros cuadrados)

La posibilidad de realizar el análisis espacial a un nivel de desagregación inferior al municipio y alcaldía se ve imposibilitado por la ausencia de variables con los que calcular indicadores de las dimensiones de gestión fiscal, gobernabilidad y transparencia (no existen variables de ningún tipo a nivel de ageb o sección electoral con los que elaborar indicador alguno) y gran número de la dimensión de Riesgo de desastres, cambio climático y calidad medioambiental (únicamente sería posible calcular tres indicadores de esta dimensión: cobertura de agua; cobertura de alcantarillado y cobertura energética), todo a pesar de la idoneidad de la escala de ageb y sección electoral para el análisis espacial a escala urbana.

## 5. Conclusiones

El estudio de la sustentabilidad ambiental urbana tiene importancia creciente ya que las ciudades son espacios en los que vive la mayor parte de la población y donde se desarrollan predominantemente las actividades económicas y sociales, y a consecuencia de lo anterior surgen problemas de tipo socioambiental. Del mismo modo determinar el patrón espacial y distribución de la sustentabilidad es aspecto fundamental para la comprensión del fenómeno y en la propuesta de posibles medidas correctivas para su solución al determinar y delimitar las áreas más desfavorecidascon un respaldo geoestadístico.

Teniendo presente esta realidad, en este trabajo se construyó un índice resumen de sustentabilidad ambiental urbana que fue convenientemente validado, contemplando las tres bases de la sustentabilidad:Riesgo de desastres, cambio climático y calidad medioambiental; desarrollo urbano integral; y gestión fiscal, gobernabilidad y transparencia; incluyendo la mayoría de las temáticas propuestas por el BID en su ICES gracias a la creación de un total de 35 indicadores. Con el referido índice se pudo cuantificar eficazmente la sustentabilidad desde una perspectiva espacial en un territorio urbano de gran extensión, complejidad y excepcional volumen demográfico como es la Megalópolis del Centro de México, a un ni-

vel de desagregación conveniente y máximo, dados los requerimientos de disponibilidad de variables para la elaboración de los indicadores. Se elaboraron por vez primera un significativo número de indicadores para el caso de México a nivel de municipalde los propuestos por el BID para Latinoamérica, incorporando la gran mayoría de las 23 temáticas de sustentabilidad. Únicamente no se pudieron incluír tres, las temáticas de gestión pública participativa, gestión pública moderna y transparencia, todas ellas de la dimensión de gestión fiscal, gobernabilidad y transparencia, ante la ausencia de datos.

En el estudio de la sustentabilidad urbana, este trabajo aporta primordialmente la novedad de su enfoque espacial conla aplicación de técnicas de análisis espacial con el Índice de Sustentabilidad Ambiental Urbana. Se determinó su patrón espacial en la megalópolis, delimitando de forma precisa aquellas áreas con mayor y menor sustentabilidad. Se averiguó que los niveles de sutentabilidad no presentan una distribución aleatoria en la megalópolis y se demostró con respaldo geoestadístico la existencia de asociación espacial, y por medio de cartografía, de clústeres según tipología y su exacta localización. Si bien existen contados estudios de la sustentabilidad ambiental urbana, como se ha indicado en la discusión, no se han realizado hasta el presente trabajo en México ni en un espacio urbano de tipo megalopolitano.

Del análisis espacial de la sustentabilidad se extrane las siguientes conclusiones: en la Megalópolis del Centro de México existe una significativa aurocorrelación espacial de niveles de sustentabilidad ambiental urbana, o lo que es lo mismo, presencia de agrupamientos de unidades espaciales (municipios y alcaldías) de valores altos y bajos de sustentabilidad. Como se ha mencionado anteriormente, existe una dualidad centro-periferia en las diferentes zonas metropolitanas de la megalópolis, ya que los niveles de sustentabilidad ambiental urbana son más elevados en los municipios centrales metropolitanos (incluyendo las capitales y municipios contiguos de carácter conurbado) que en los municipios exteriores periféricos (con algunas excepciones en Puebla y Tlaxcala - Apizaco). Dentro de los municipios y alcaldías con niveles de sustentabilidad ambiental urbana más elevados, es de destacar la diferencia existente entre aquellas pertenecientes a la Ciudad de México y los restantes municipios centrales de las demás zonas metropolitanas. La desigualdad de niveles de sustentabilidad viene respaldada con el análisis de clúster, los clústeres de valores altos de sustentabilidad están localizados en los municipios y alcaldías centrales metropolitanas, mientras que los clústeres de bajos niveles, aparecen fundamentalmente en municipios exteriores periféricos. Paradójicamente son aquellas zonas de la megalópolis con un carácter urbano menos marcado las que presentan una sustentabilidad más baja.

Estas conclusiones tienen interés y valía al tratarse de la primera aproximación al fenómeno de la sustentabilidad ambiental urbana en sus tres dimensiones desde una perspectiva espacial en un espacio urbano de tipo megalopolitano. Se ha demostrado lo factible de poder realizar posteriores estudios de sustentabilidad ambiental urbana en México con enfoque espacial.

La delimitación precisa de la megalópolis según sus niveles de sustentabilidad ambiental urbana abre nuevas posibilidades para posteriores trabajos, como la caracterización del comportamiento de los tres subíndices de sustentabilidad en áreas con baja y alta sustentabilidad ambiental urbana y averiguar si existe una dicotomía de comportamiento de los mismos y cuales afectan más a la sustentabilidad según en que zonas de la megalópolis.

El manifiesto desequilibrio existente en la Megalópolis mexicana en sus niveles de sustentabilidad ambiental urbana, y la existencia de espacios concretos con niveles bajos y muy bajos, muestran la necesidad de intervención de políticas públicas en temas de agua, alcantarillado y saneamiento, gestión de residuos, control de la contaminación del aire y aguas, consideración ante desastres naturales (como el riesgo de inundación en el caso megalopolitano), uso del suelo y ordenamiento del territorio, desigualdad urbana (pobreza, marginación), movilidad y transporte público, informalidad económica, educación, servicios de salud o incluso aspectos de gobierno local en aquellos espacios (municipios y alcadías) más rezagados.

El estudio de la distribución geográfica y asociación espacial de los eventos de salud es denominada epidemiologia espacial (Pérez Abad, 2014). Uno de sus principales objetivos es mostrar qué parte de la variación espacial de la distribución de la frecuencia de una enfermedad pueda estar explicada por factores de riesgo (baja sustentabilidad ambiental) y no atribuidas al azar. En diversos estudios, se ha demostrado la relación causa efecto de la contaminación atmosférica y de las aguas sobre la morbilidad, especialmente en enfermedades cardiorrespiratorias (Franco Piedrahita, 2012), neoplásicas, digestivas e infecciosas (Riojas Rodríguez, Schilmann, López y Finkelman, 2013).

Así pues, una futura línea de trabajo será el estudio de la epidemiología espacial en la Megalópolis del Centro de México en relación con la sustentabilidad ambiental urbana. Se pretende aplicar técnicas de análisis espacial de tipo bivariado, como el Índice Bivariado de Moran (Wartenberg, 1985) que permitan el análisis de posibles relaciones de causa y consecuencia del ISAU con la incidencia espacial de mortalidad por enfermedades respiratorias y digestivas o neoplasias.

## Referencias


Andrade Medina, P. y Bermúdez Cárdenas, D.C. (2010). La sostenibilidad ambiental urbana en Colombia. *Bitácora 17, 2*(17), 73-93. http://dx.doi.org/10.15446/bitacora

Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association LISA. *Geographical Analysis*, *27*(2). 93-115. https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x

Auditoría Superior de la Federación (ASF) (2012). *Análisis de la Deuda Pública de las Entidades Federativas y Municipios*. Agosto de 2012. Ciudad de México: Cámara de Diputados

Banco Nacional de México S.A. (BANAMEX), Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos (BANOBRAS), Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (INFONAVIT), Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente (CNM), Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO) (2014). Índice de Ciudades Com*petitivas y Sustentables 2014*. México.

Barcelata Chávez, H. (2015). Círculos de pobreza y finanzas municipales en México. *Economía, Teoría y práctica*, (42), 69-103. https://doi.org/10.24275/ETYPUAM/NE/422015/Barcelata

Banco Interamericano de Desarrollo (BID) (2011). *Sostenibilidad Urbana en América Latina y el Caribe,* Oficina de Relaciones Externas del BID.

Banco Interamericano de Desarrollo (BID) (2013). *Indicadores de la Iniciativa Ciudades Emergentes y Sostenibles*. *Guía metodológica,* Banco Interamericano de Desarrollo, segunda edición del Anexo 2.

Celemín, J. P. (2009). Autocorrelación espacial e indicadores locales de asociación espacial. Importancia, estructura y aplicación. *Revista Universitaria de Geografía*, 18, 11-31. Recuperado de http://www.redalyc.org/pdf/3832/383239099001.pdf

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) (2010). Índice de peligro por inundaciones a nivel municipal. Subdirección de Riesgos Hidrometeorológicos.

Chasco, C. (2006). Análisis estadístico de datos geográficos en geomarketing: el programa GeoDa. *Distribución y Consumo*, 2, 34-45. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/28281725_Analisis_estadistico_de_datos_geograficos_en_geomarketing_el_programa_GeoDa

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2012). *Atlas Digital del Agua. México 2012*. Sistema Nacional de Información del Agua.

Consejo Nacional de Población (CONAPO) (2012a). *Delimitación de las Zonas Metropolitanas de México 2010*. México: Consejo Nacional de Población.

Consejo Nacional de Población (CONAPO) (2012b). Índice de marginación urbana. México: Consejo Nacional de Población.

Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) (2011). Metodología para la medición multidimensional de la pobreza en México, *Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 2(1), 36-64. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/rde/2011/01/10/metodologia-para-la-medicion-multidimensional-de-la-pobreza-en-mexico/

Connolly, P. y Cruz, M.S. (2004). Nuevos y viejos procesos en la periferia de la Ciudad de México. En A. Guillermo Aguilar (Coord.), *Procesos metropolitanos y grandes ciudades. Dinámicas recientes en México y otros países* (pp. 455-475). México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

Cortés, H.G. y Peña, J.I., (2015), De la sostenibilidad a la sustentabilidad. Modelo de desarrollo sustentable para su implementación en políticas y proyectos, *Revista Escuela de Administración de Negocios*, 78, 40-54. https://doi.org/10.21158/01208160.n78.2015.1189

Diario Oficial de la Federación (DOF) (15/07/1996). *Programa General de Desarrollo Urbano del Distrito Federal,* México.

Escobar, L., (2006). Indicadores sintéticos de calidad ambiental: un modelo general para grandes zonas urbanas. *EURE*, *32*(96), 73-98. http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612006000200005

Franco Piedrahita, M.C., (2012). *Análisis espacio-temporal de la morbilidad asociada a la contaminación atmosférica en el municipio de Itagüí*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Medellín, Colombia.

Gómez, D., Prieto, M.E., Mellado, A. y Moreno, A. (2015). Análisis espacial de la mortalidad por enfermedades cardiovasculares en la ciudad de Madrid, España. *Revista Española de Salud Pública, 89*(1), 30-31. http://dx.doi.org/10.4321/S1135-57272015000100004

Gottmann, J. (1957). Megalopolis or the urbanization of the Northeastern seaboard. *Economic Geography*, *3*(33), 189-200. https://doi.org/10.2307/142307

Graizbord, B. (2002). Elementos para el reordenamiento territorial: Usos del suelo y recursos. *Estudios Demográficos y Urbanos*, *17*(2), 411-423. http://dx.doi.org/10.24201/edu.v17i2.1146

Gaceta Oficial de la Ciudad de México, (04 de mayo de 2018). *Ley Orgánica de Alcaldías de la Ciudad de México*, México.

Garza, G. (2010). La transformación urbana de México, 1970-2020 en G. Garza y M. Schteingart (Coords.), *Los grandes problemas de México. Desarrollo urbano y regional* (pp. 31-87). Ciudad de México: El Colegio de México.

Hernández, V. (2015). Análisis geoespacial de las elecciones presidenciales en México, 2012. *EURE*, *41*(122), 185-207. http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612015000100009

Hernández, E. M., Adame, S. y Cadena, E., (2017). Los retos de la sustentabilidad urbana en México. Reflexiones sobre su evaluación a través de la Metodología ICES del BID. *Quivera, 19*(1), 85-97.

Hinojosa, R., Garrocho, C. F., Campos, J. y Campero, A. C. (2015). Pronóstico de accidentes viales en el espacio intrametropolitano de Toluca: un enfoque Bayesiano. *Transportes, 23*(2), 43-55. https://doi.org/10.14295/transportes.v23i2.882

Imaz , M., Ayala , D., y Beristain , A.G. (2014). Sustentabilidad, territorios urbanos y enfoques emergentes interdisciplinarios, *Interdisciplina*, *2*(2), 33-49. https://doi.org/10.22201/ceiich.24485705e.2014.2.46523

Instituto Nacional de Ecología (INE) (2012). Iniciativa de ICLEI-Gobiernos Locales por la Sustentabilidad. Plan de Acción Climática Municipal (PACMUN).

Instituto Nacional para la Evaluación de la Educación (INEE) (2015). *Resultados Nacionales de Planea Educación Básica 2015*.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (2009). *Censos Económicos 2009*. Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (2010a). *Marco Geoestadístico*. Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (2010b). *Estadística de finanzas públicas estatales y municipales*.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (2011a). *Censo de población y vivienda 2010*. Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (2011b). *Cartografía geoestadística urbana, Censos Económicos 2009, DENUE marzo 2011*.

Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO) (2014). Índice de Ciudades Competitivas y Sustentables 2014. México

Lavado, J.C. (2015). Evaluación de autocorrelación espacial global y local para zonas de tránsito. En *XIII Rio de Transportes,* 19 e 20 de agosto. Río de Janeiro, Brasil.

Martínez, P. M. (2015). La producción del espacio en la ciudad latinoamericana. El modelo del impacto del capitalismo global en la metropolización. *Hallazgos*, *12*(23), 211-229. https://doi.org/10.15332/2422409X

Martínez Peralta, C.M. (2016) Respuestas urbanas al cambio climático en América Latina. *Estudios Sociales*, *25*(47), 353-358. https://doi.org/10.24836/es.v25i47.321

Martori, J.C. y Hoberg, K. (2008). Nuevas técnicas de estadística espacial para la detección de clusters residenciales de población inmigrante. *Scripta Nova Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, *12*(256-280). Recuperado de https://revistes.ub.edu/index.php/ScriptaNova/article/view/1409

Méndez, M. A. (2012) *La sostenibilidad y sustentabilidad en los museos, dos enfoques principales: La museología tradicional y la nueva museología. Estudio de caso en dos museos de la provincia de pichincha*. Quito: Universidad Tecnológica Equinoccial.

Moreno Sánchez, E. (2013). Indicadores para el estudio de la sustentabilidad urbana en Chimalhuacán, Estado de México. *Estudios Sociales*, (43), 161-186. https://doi.org/10.24836/es.v22i43.51

Mori, K. y Christodoulou, A. (2012). Review of Sustainability Indices and Indicators: Towards a New City Sustainability Index (CSI). *Environmental Impact Assessment Review*, (32), 94-106. http://dx.doi.org/10.1016/j.eiar.2011.06.001

Olivares, B. (2014). Aplicación del Análisis de Componentes Principales (ACP) en el diagnóstico socioambiental. Caso: sector Campo Alegre, municipio Simón Rodríguez de Anzoátegui. *Multiciencias*, *14*(4), 366-368. Recuperado de https://produccioncientificaluz.org/index.php/multiciencias/article/view/19470/19439

Okumuş, G. y Edelman, D. (2015). An indicator modelo f the spatial quantification and pattern analysis of urban sustainability: A case of study of Cincinatti, Ohio. *Current Urban Studies*, (3), 231-240. http://dx.doi.org/10.4236/cus.2015.33019

Pérez Abad, N. (2014). *Minería de datos espaciales: detección de agregaciones espaciales de riesgo de morir por cáncer de mama y próstata en España y su asociación con la contaminación industrial* (Trabajo de Fin de Máster). Facultad de estudios estadísticos, Universidad Complutense de Madrid.

Riojas Rodríguez, H., Schilmann, A., López Carrillo, L., y Finkelman, J. (2013). La salud ambiental en México: situación actual y perspectivas futuras. *Salud Pública de México*, *55*(6), 638-649. Recuperado de http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10628941011.

Rivas Tovar, L. A., Carmona Tapia, S., Chávez Espejel, J.A., García Márquez, M., Maldonado Hernández, B. (2006). Mapas políticos metropolitanos en las megalópolis mexicanas. *Universidad & Empresa*, 5, (10), 7-31.

Ruiz Sánchez, J. (2012), Ciudad, complejidad y energía, *Ciudad y Territorio. Estudios Territoriales*, 171, 73-86. Recuperado de https://www.eukn.eu/fileadmin/Lib/files/ES/2013/04-CyTET%20171.pdf

Sánchez González, D. (2012). Aproximaciones a los conflictos sociales y propuestas sostenibles de urbanismo y ordenación del territorio en México. *Revista de Estudios Sociales,* (42), 40-56. http://dx.doi.org/10.7440/res42.2012.05

Sánchez Gamboa, J.M. y Taddei Bringas, C. (2014). Regiones y distribución espacial de las actividades económicas en Sonora. *Estudios Sociales*, *22*(43), 189-215. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-45572014000100008

Secretaria de Desarrollo Social (SEDESOL), Consejo Nacional de Población (CONAPO) e Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (2012). *Delimitación de las Zonas Metropolitanas de México 2010*. México.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2014). *El medio ambiente en México, 2013-2014*. México.

Shen, L. y Guo, X. (2014). Spatial quantification and pattern analysis of urban sustainability based on a subjectively weigh indicator model: A case study in the city of Saskatoon, SK, Canada. *Applied Geography*, 53, 117-127. http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.06.001

Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire (SINAICA) (2010). Dirección General del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental. México.

Tonon, G. (2010). La utilización de indicadores de calidad de vida para la decisión de políticas públicas. *Polis, Revista de la Universidad Bolivariana*, *9*(26), 361-370. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-65682010000200017

Torre Jofré, M. (2009). Índice de Sostenibilidad Urbana: una propuesta para la ciudad compleja. *Revista Digital Universitaria*, *10*(7). Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Recuperado de http://www.revista.unam.mx/vol.10/num7/art44/int44.htm

Torres Tovar, R., Adame Martínez, S. y Campos Medina, E. (2014). Propuesta de indicadores para medir la sustentabilidad en la zona metropolitana de Toluca. *Debate Económico, 3*(9), 121-143. Recuperado de https://issuu.com/laesmx/docs/debateno9complf

Organización de las Naciones Unidas (ONU) (2018), DESA/Population Division. World Urbanization Prospects. Recuperado de https://population.un.org/wup/Country-Profiles/

Veenhoven, R. (2000). Why social policy needs subjective indicators ?. En F. Casas y C. Saurina (Eds.), *Proceedings of the Third Conference of the ISQOLS* (pp. 807-817). Universidad de Girona.

Wartenberg, D. (1985). Multivariate spatial correlation: a method for exploratory geographical analysis. *Geographical Analysis*, *17*(4), 263-283. https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1985.tb00849.x

Zulaica, L. y Celemín, J.P. (2008). Estudio de las condiciones de calidad de vida en los espacios urbanos y periurbanos del sur de la ciudad de Mar del Plata (Argentina) a partir de la elaboración y análisis espacial de un índice sintético socioambiental. *Papeles de Geografía*, (47-48), 215-233. Recuperado de http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40712217013

Zulaica, L. y Ferraro, R. (2012). Procesos de crecimiento, indicadores de sustentabilidad urbana y lineamientos de intervención en el periurbano marplatense. *Arquisur Revista*, (2), 124-142. https://doi.org/10.14409/ar.v1i2.936

Zulaica, L. (2013). Sustentabilidad social en el periurbano de la ciudad de Mar del Plata: análisis de su evolución a partir de la construcción y aplicación de un Índice de Habitabilidad. *Revista Electrónica Geoaraguaia*, (3), 1-25. Recuperado de https://core.ac.uk/download/pdf/52476966.pdf