

Medición de la expansión urbana en México entre los años 2000 y 2010

Measuring urban sprawl in Mexico between 2000 and 2010

Jesús A. Treviño C.*

ARTICLE INFO

Received:
October 10, 2018.

Received in revised
form: November 28,
2018.

Accepted:
November 28, 2018.

Published online:
December 27, 2018.

ABSTRACT

Relative measurements are necessary to measure urban sprawl in different city sizes. For this reason, all measures of urban sprawl are relative, so far. Main problem in relative measures is that they overestimate urban sprawl in small cities and underestimate it in the big ones. This research transforms relative values in absolute values to solve this problem. The study estimates the Index of Urban Sprawl (IUS) from the OECD, a relative measure, for 135 cities in Mexico and it transforms it into absolute values.

The research tests that urban sprawls occur in all city sizes of the case study. Two main contributions of this research are: (a) In the literature on urban sprawl it is the first attempt to turn relative intensity in absolute intensity; and (b) In Mexico, it also is the first empirical-conceptual study for a set of cities where urban sprawl is the central research topic.

Resumen. Las mediciones relativas son necesarias para medir la expansión urbana en ciudades de distinto tamaño. El problema de las mediciones relativas es que sobrevaloran la expansión urbana en las ciudades pequeñas y la subestiman en las grandes. Este estudio calcula el Índice de Expansión Urbana (IEU) de la OECD, una medida relativa, para 135 ciudades de México y lo transforma en valores absolutos para corregir el problema.

La investigación comprueba que la expansión urbana ocurre lo mismo en ciudades grandes que pequeñas del estudio de caso.

Dos contribuciones destacan en la investigación: (a) En la literatura sobre expansión urbana es el primer esfuerzo por convertir la intensidad relativa en intensidad absoluta; y (b) En México, además, es el primer estudio empírico-conceptual para un conjunto de ciudades donde la expansión urbana es tema el central de investigación.

Keywords: Urban sprawl; relative and absolute intensity; OECD; Mexico.

Palabras clave: Expansión urbana; intensidad relativa y absoluta; OECD; México.

To cite this article: Treviño C., J. A. (2018). Medición de la expansión urbana en México entre los años 2000 y 2010. *Urbana*, 19, 84-113. Retrieved from <http://www.urbanauapp.org/>

* Profesor. Facultad de Arquitectura, Universidad Autónoma de Nuevo León, México: jtreviso41@hotmail.com

Introducción

La expansión urbana es un fenómeno multidimensional que ha sido estudiado por decenas de indicadores globales e intraurbanos que refieren tanto la forma física de la ciudad como la ocupación del suelo. Aunque la naturaleza de la expansión urbana es multidimensional, hay estudios que analizan las características de la expansión urbana de manera individual o unidimensional para la consecución de un objetivo específico. Entre estos últimos estudios destaca un reporte de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD: *Organisation for Economic Co-operation and Development*) para México que aborda parcialmente la expansión urbana como la tasa de expansión horizontal por ampliación o agrandamiento de la mancha urbana comparada con el crecimiento de su población (OECD, 2015). Esta investigación retoma el índice de expansión urbana (IEU) utilizado por la OECD, lo sintetiza y convierte en una medición de intensidad absoluta para corregir el problema de sobrevaloración/subestimación de los datos en las mediciones relativas. Esta perspectiva analítica y empírica es inédita en México porque no hay estudios que consideren la expansión de la mancha urbana como temática principal para el conjunto de ciudades del sistema urbano nacional.

Esta investigación es un primer intento por cubrir el vacío de estudios sobre la expansión urbana en el sistema nacional. El objetivo central de esta investigación es medir, clasificar y jerarquizar la expansión urbana en 135 ciudades mexicanas mayores de 50 mil habitantes en el 2010 y verificar las hipótesis de trabajo. El estudio busca la consecución de este objetivo en siete secciones, y un apéndice metodológico-algebraico (en línea). Esta primera sección presenta el tema, plantea la necesidad de la investigación como ausencia de estudios sobre expansión urbana, declara el objetivo de la investigación y esboza la estructura general del escrito. La segunda sección proporciona un breve repaso de la literatura, presenta el problema de investigación como vacío temático importante y explica la necesidad disciplinaria de medir la intensidad absoluta de la expansión urbana. La sección culmina con un resumen de los principales indicadores desde la perspectiva censal de México. La tercera sección presenta las preguntas de investigación, formula las hipótesis de trabajo, proporciona las definiciones operativas utilizadas en el estudio y desglosa la metodología del trabajo. Esta sección contiene las mejoras al Índice de Expansión Urbana de la OECD. Los ajustes y demostraciones algebraicas se remiten al apéndice del escrito (en línea). La cuarta sección aborda el estudio de caso. Es la parte empírica del escrito. Aquí se aplican las propuestas metodológicas y cobran sentido práctico las definiciones operativas de la sección anterior. Esta sección muestra los datos y acota el periodo de estudio. La sección advierte sobre la inconsistencia o veracidad de algunos resultados como producto del rezago de la información y la alta dinámica demográfico-espacial de las ciudades. La quinta sección repasa conceptos, analiza resultados, discute los hallazgos generales y evalúa los resultados e implicaciones de las pruebas de hipótesis. La quinta sección también presenta un recuento de las tareas más importantes de la investigación y desglosa las bondades y limitaciones del trabajo realizado. La sexta sección concluye y presenta las notes finales. La sección destaca los ajustes y aportes metodológicos más relevantes de la investigación y los aportes del estudio de caso. También presenta la utilidad del estudio, así como las tareas por incluir en propuestas de investigación futura. Finalmente, la séptima sección proporciona las referencias bibliográficas del escrito.

A estas siete secciones se añaden un apéndice que contiene las demostraciones algebraicas de la sección metodológica y un suplemento con los datos de entrada, el Índice de Expansión Urbana y la intensidad absoluta para las 135 ciudades en la investigación México.

Estado del arte y planteamiento del problema

Un grupo importante de autores coincide en que la complejidad de la expansión urbana no puede ser expresada en su totalidad por una o dos variables (Galster et al., 2001; Ewing et al., s.f.; Angel, 2012; Hamidi et al., 2015). Esta complejidad no es impedimento para que la expansión urbana se aborde lo mismo como un fenómeno multidimensional que como un fenómeno univariado, dependiendo del objeto de estudio y con las advertencias apropiadas al caso. La medición de la expansión urbana incluye una larga lista de indicadores. Una revisión reciente de 126 estudios empíricos muestra el uso 162 indicadores en tres grupos o tipos de métricas (Reis et al., 2015): Métrica del Paisaje, Métrica Geoespacial y Estadística Espacial. Estos índices generalmente miden dos aspectos distintos de la expansión urbana: la forma física y el patrón de ocupación del suelo urbano. El interés en la forma física se finca exclusivamente en la configuración o forma geométrica de la ciudad sin atender lo que pasa dentro de ella. Los índices más usuales sobre la forma física están contenidos en dos rutinas de cómputo sobre métrica urbana: FRAGSTATS¹ y Clear Tools.²

Por otro lado, el análisis de la ocupación del suelo mide la forma urbana tomando en cuenta la ubicación de la población y sus actividades al interior de la ciudad. Los índices que capturan la forma urbana en este segundo enfoque son múltiples y variados e involucran el uso de programas estadísticos con información georeferenciada. Ejemplos de estos programas son rutinas en el programa ArcGis, Geoda, y adaptaciones del programa Geo-Segregation Analyzer, originalmente diseñado para medir la segregación espacial.

Los índices sobre la ocupación del suelo están diseñados para medir distintas dimensiones de la expansión urbana, tales como densidad, centralidad, policentricidad y accesibilidad. No hay acuerdo sobre las características que deben incluirse y el número de indicadores que representan a estas dimensiones. En ocasiones, las dimensiones e indicadores cambian para los mismos autores en distintos estudios de caso o en los mismos casos en distinto momento. Esta variación muestra que el objetivo del estudio, la evolución del pensamiento sobre la expansión urbana y las mejoras o ampliaciones en la base de datos determinan tanto el enfoque como el uso de los indicadores en la investigación específica (por ejemplo, Ewing revisa y actualiza su propio trabajo en Hamidi et al., 2015).

Los índices de expansión urbana basados en la forma física o la ocupación del suelo pueden subdividirse, a su vez, en urbanos globales e intraurbanos. Los índices globales miden los aspectos físicos o socioeconómicos sin conocimiento o prejuicio de la composición interna o morfología de la ciudad, por ejemplo, el grado de la dispersión del área urbana. Los índices globales no implican una métrica multidimensional de la expansión urbana sino que son generales porque no atienden a lo que pasa dentro de la ciudad. Entre los índices globales, destacan los índices sobre densidad o los índices sobre métrica del paisaje. El resto de los índices, por su naturaleza intra-urbana, son usualmente socorridos para definir la expansión urbana en términos de centralidad, policentricidad y accesibilidad vial (Cuadro 1).

Los índices de ocupación del suelo, por otro lado, miden la morfología urbana en base al patrón espacial de variables demográficas y/o socioeconómicas específicas, tales como el patrón de densidad de la vivienda y la población por subárea de la ciudad. En realidad no hay una línea clara y definida para clasificar las mediciones de la expansión urbana en base a indicadores estrictamente globales o con indicadores de naturaleza intraurbana. Por lo tanto, la clasificación de mediciones globales e intraurbanas en esta investigación es tentativa (Cuadro 1). A esta clasificación de indicadores físicos y de ocupación del suelo se añaden algunas versiones dinámicas de la medición urbana total, por ejemplo, el índice de expansión

¹ Disponible de manera gratuita en <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html> [consulta: 15 de mayo de 2016].

² Disponible de manera gratuita en http://clear.uconn.edu/tools/Shape_Metrics/index.htm [consulta: 15 de mayo de 2016].

urbana de la OECD (Brezzi y Veneri, 2015); la medición intraurbana, por ejemplo, el índice de centralidad demográfica de Bento *et al.* (2005); o la dinámica de la densidad de la población, como en el índice de expansión urbana de Anderson (2011). La identificación de los centros y subcentros urbanos es parte de la medición y caracterización de la expansión urbana, tal como el porcentaje de la población o empleo metropolitano ubicado en los centros y subcentros urbanos. Esta identificación es un tema de investigación *per se* que ha generado una literatura específica con resultados aún en debate. Los escritos recientes de Sevtsuk y Amindarbari (2012), Hamidi et al. (2015) y Hajrasouliha y Hamidi (2016) son ejemplos de la búsqueda de procedimientos alternativos que lleven a una identificación aceptable de centros y subcentros.

En México, los estudios iniciales sobre la expansión urbana fueron parte de investigaciones más amplias sobre el proceso de urbanización y el desarrollo regional (Unikel et al., 1978; Scott, 1982). La tendencia a incorporar la expansión urbana de manera parcial en investigaciones más amplias persiste hasta hoy en estudios sobre competitividad urbana (IMCO, 2014) o sobre el potencial municipal (CONAPO, 2014). Recientemente se han publicado estudios sobre características específicas de la expansión urbana, tales como la identificación de centros y subcentros urbanos en ciudades individuales (Fuentes y Hernández, 2015) o subconjuntos de ciudades (Álvarez de la Torre, 2011) o sobre la expansión física de ciudades individuales (Suárez y Delgado, 2007). En este contexto, sólo un reporte internacional reciente aborda la expansión urbana de manera global en las 30 ciudades más grandes de México (OECD, 2015). El reporte únicamente presenta de manera gráfica un Índice de Expansión Urbana sin proporcionar los valores del propio índice. La información o los índices en esa gráfica no aparecen en la base de datos utilizada por la OECD para otras ciudades del mundo.³ El índice de expansión urbana utilizado por la OECD para México había sido previamente “probado” en un documento de trabajo de ese organismo y publicado simultáneamente por los autores a título personal (Brezzi y Veneri, 2015). El índice aborda la densidad urbana de manera global, de acuerdo con la clasificación en la Cuadro 1.

No existen en México investigaciones que consideren directamente la expansión urbana como tema central sino como parte de investigaciones más amplias. Con la excepción de la información gráfica en el reporte de la OECD (2015), no hay estudios, ni siquiera parciales, que aborden la expansión urbana de manera global para las ciudades de México (en el sentido de los índices en la Cuadro 1). Además, la medición de la OECD, la única medición global para cada una de las treinta ciudades más grandes de México, utiliza un índice de intensidad relativa. Es bien sabido que los índices relativos sobrevalúan la expansión urbana en las ciudades pequeñas y la subestiman en las ciudades grandes. Los índices relativos son necesarios para comparar áreas de tamaño distinto. El Índice de Expansión Urbana de la OECD es una medida global dinámica de ocupación del suelo que calcula y compara el crecimiento urbano relativo de las distintas ciudades del sistema urbano nacional. En general, los índices relativos deben aplicarse con cautela porque las interpretaciones usualmente son incompletas y propensas al error.

³ Disponible en <http://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=CITIES> [consulta: 15 de mayo de 2016].

Cuadro 1. Selección y clasificación de los índices que miden la expansión urbana con información en los censos poblacionales y la cartografía censal de México.

Naturaleza del Índice de Expansión Urbana	
Urbano global	Intraurbano
<i>Densidad</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Índice de expansión urbana de la OECD (2014). • <i>Densidad demográfica global de los agebs urbanos</i> (SEDESOL, 2012; CONAPO, 2014). 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>DMediana</i>. Porcentaje de población que vive en agebs de baja densidad (Lopez y Hynes, 2003). • <i>DMediaB</i>. Porcentaje de la población en agebs con densidad por debajo de la media remuestrada con remplazo (<i>bootstrap</i>) al 95%. • <i>DElipse</i>. Elipse para población que vive en agebs de baja densidad entre elipse para todos los agebs (sugerido por Yang et al., 2012).
<i>Centralidad</i>	
	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Centralidad demográfica</i> (Bento et al., 2005). • <i>Densidad bruta de la población en el núcleo principal versus el resto de los agebs de la ciudad</i>. También puede elaborarse una versión dinámica de esta medición. • <i>Porcentaje de la población en el núcleo o área principal</i> (%). • <i>Índice de disimilitud</i> (ID). Concentración. • <i>índice global de Moran</i>. Aglomeración. • <i>CV-P</i>. Coeficiente de variación (CV) de la densidad de población en grupos de manzanas censales (Hamidi et al., 2015).
<i>Policentricidad</i>	
	<ul style="list-style-type: none"> • Porcentaje de la población que habita en áreas con densidad media y/o alta (basado en Yang et al (2012). • Ratio de la elipse de población que habita en áreas con densidad media y/o alta dividida entre el área de la elipse para el total de la población urbana (Yang et al., 2012).
<i>Accesibilidad vial</i> (Hamidi y Ewing, 2015; Song y Kanapp, 2004)	
	<ul style="list-style-type: none"> • Manzanas (<i>mediana del área</i>). • <i>Porcentaje de manzanas urbanas pequeñas</i> (< 1ha). • Tamaño promedio de las manzanas.
<i>Configuración espacial (Métrica del paisaje)</i> (Programas FRAGSTATS y Clear)	
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Porosidad urbana</i> (PU). • <i>Índice de fragmentación urbana</i> (IFU). • <i>Forma de la ciudad (FC) con ejes XY de elipses</i>. Se requiere rutina de cómputo especial. • <i>Forma de la ciudad (FC) con ejes XY de elipses (versión intraurbana sin ponderar)</i>. Se Puede utilizar ArcGis. 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Forma de la ciudad (FC) con ejes XY de elipses (versión intraurbana ponderada)</i>. Se Puede utilizar ArcGis.

Fuente. Elaboración propia.

Nota. El índice utilizado en esta investigación resaltado en negritas.

Metodología y definiciones operativas

Esta investigación articula dos grupos de preguntas de trabajo. El primero es de carácter metodológico; el segundo, de corte empírico. En el primer grupo atiende un problema familiar en las mediciones relativas de la expansión urbana: la sobrevaloración de la expansión urbana en las ciudades pequeñas y la subestimación en las ciudades grandes. Si el problema es el valor absoluto de la expansión urbana, la pregunta lógica es, ¿porqué no convertir la

intensidad relativa en intensidad absoluta?, ¿es posible esta conversión? En caso afirmativo, ¿se altera la jerarquía urbana si la medición de la expansión urbana se expresa en intensidad absoluta?

El segundo grupo de preguntas aborda la relación entre expansión urbana y tamaño de población. En general, en los estudios para los países desarrollados (Huang et al., 2008; Schneider y Woodcock, 2008) y, en particular, Europa (Shwarz, 2010; Turok y Mykhnenko, 2007; Kasanko et al., 2006) y los EEUU (Lopez y Hynes, 2003; Hamidi et al., 2015), la expansión urbana ocurre lo mismo en ciudades grandes que pequeñas. Esta evidencia registra la baja o nula correlación entre los índices de expansión urbana y población urbana. Este resultado es consistente tanto en mediciones univariadas como multidimensionales. Utilizando una medición unidimensional, ¿Cómo se manifiesta este fenómeno en las ciudades de México?, ¿Los resultados son los mismos si utilizan medidas de intensidad relativa e intensidad absoluta?, ¿es la expansión urbana independiente del tamaño de las ciudades?

El primer grupo de preguntas atiende el problema de sobrevaloración/subestimación de la expansión urbana con mediciones relativas. La investigación sugiere la transformación de valores relativos en valores absolutos. La hipótesis en este renglón es que esta conversión de valores proporciona una medición acorde con el tamaño del área observada en el año inicial, en unidades convencionales (hectáreas), sin alterar significativamente la jerarquía establecida por la intensidad relativa. Esta suposición se basa en un escrutinio preliminar del Índice de Expansión Urbana. La prueba de hipótesis del estudio de caso proporciona los detalles empíricos de la especulación. La naturaleza de la pregunta y la asimetría en la distribución de los datos sugieren el uso del coeficiente de correlación de rangos para verificar esta hipótesis.

El segundo grupo de preguntas surge de la literatura revisada en la formulación de las preguntas de investigación. Los estudios de caso examinados encuentran que la expansión urbana se manifiesta por igual en las ciudades grandes y chicas. La hipótesis en este trabajo es que en México se sostienen estos resultados, independientemente de que se utilice la intensidad relativa o absoluta. Las pruebas no-paramétricas Chi-cuadrada y Kruskal-Wallis, por la asimetría usual en la distribución de la expansión urbana, se utilizan para constatar esta presunción.

El punto de partida en la medición de la expansión urbana en esta investigación es el planteamiento metodológico de la OECD (Brezzi y Veneri, 2015), por varias razones:

- (a) Aunque no se proporciona la información en la base de datos de este organismo ni en su reporte reciente sobre política urbana en México (OECD, 2015), el Índice de Expansión Urbana (IEU) es fácilmente replicable con la información censal disponible en el estudio de caso;
- (b) Es el único índice global que se ha aplicado (parcialmente) a México que puede estimarse fácilmente para el universo de las 135 ciudades en SEDESOL (2012);
- (c) Es comparable con el índice calculado para otras ciudades del mundo;
- (d) Al combinar el crecimiento de la mancha urbana y el crecimiento de la población, es el índice global más completo de densidad, de acuerdo a la clasificación en la Cuadro 1. El otro índice global, no considerado aquí, es la Densidad demográfica global de los AGEBS urbanos;
- (e) Es claro y riguroso en su definición de manera tal que el debate inconcluso sobre expansión urbana no sea complicado innecesariamente por una definición oscura o ambigua de la expansión misma;
- (f) Puede ser sintetizado y convertido a una medida absoluta mediante procedimientos usuales en ciencia regional;
- (g) Las correcciones y mejoras al índice pueden servir a la medición de la expansión urbana en los reportes de la OECD y a los usuarios internos y externos de su base de datos.

La expansión urbana como intensidad relativa

En este trabajo, la expansión urbana es el crecimiento físico de la mancha urbana de una ciudad superior al crecimiento de su población, en un marco temporal específico. Esta definición operativa está basada en la versión sintética del índice de expansión urbana propuesto por Brezzi y Veneri (2015) desglosada en el Apéndice (en línea). Estos autores proponen y utilizan un índice para medir la expansión urbana en las ciudades de los países de la OECD. El Índice de Expansión Urbana (IEU) mide el crecimiento del área construida ajustada por el crecimiento de la población en la ciudad. El índice mide el incremento del área construida si ésta hubiera crecido como lo hizo la población (referente específico). El IEU es igual a cero cuando la población y el área construida son estables en el tiempo. Es mayor (menor) a cero cuando el crecimiento del área construida es mayor (menor) que el crecimiento de la población, por ejemplo, la densidad urbana decrece (se incrementa). El índice propuesto por Brezzi y Veneri (2015) se calcula de la siguiente manera:

$$IEU_i = \frac{[urb_{i,t+n} - (urb_{i,t} * (pop_{i,t+n} / pop_{i,t}))]}{urb_{i,t}} * 100 \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde i se refiere al área metropolitana i -ésima; t se refiere al año inicial; $t+n$ es el año final; Urb es el número de kilómetros cuadrados (hectáreas en el caso de estudio mexicano) de la mancha urbana; Pop es la población total; IEU_i es el índice de expansión urbana de la ciudad i . Este índice mide simplemente la expansión de la mancha urbana si hubiera crecido como lo hizo la población total.

En el interés de la parsimonia, el Apéndice demuestra que el IEU de la OECD puede sintetizarse en la siguiente expresión:

$$IEU_i = \left(\frac{Urb_{i,t+n}}{Urb_{i,t}} - \frac{Pop_{i,t+n}}{Pop_{i,t}} \right) * 100 \quad (\text{Ec. 2})$$

Esta arreglo de términos muestra que el índice de expansión de la OECD es sencillamente la diferencia del crecimiento en la superficie menos el crecimiento en la población. Cuando la superficie crece más rápido que la población hay expansión (índice mayor que cero); en caso contrario (menor que cero) hay densificación. Esta presentación del Índice de Expansión Urbana (IEU) tiene la ventaja de que puede expresarse también como una división de fracciones, tal como el cociente de localización (LQ: *location quotient*). El beneficio de esta reducción no sólo radica en la minimización de cálculos sino también en la simplicidad para explicarlo y, sobre todo, aprovechar la abundante literatura generada sobre el LQ en ciencia regional.

$$IEU_i = \frac{\frac{Urb_{i,t+n}}{Urb_{i,t}}}{\frac{Pop_{i,t+n}}{Pop_{i,t}}} \quad (\text{Ec. 3})$$

En el índice de la OECD (versión sintética en Ec. 2), un Índice de Expansión Urbana (IEU) positivo indica un crecimiento de la mancha urbana mayor que el crecimiento de la población. Si este índice se expresara como una *ratio* o división de fracciones, como un LQ,

un valor mayor que la unidad indica que el ritmo de crecimiento del área física de la ciudad es superior al de su población (Ec. 3).

El Índice de Expansión Urbana (IEU) también puede expresarse de la siguiente manera, *sin alterar el valor obtenido por las Ec. (1) y (2), pero modificando su interpretación:*

$$IEU_i = \left[\left(\frac{Urb_{i,t+n}}{Urb_{i,t}} - 1 \right) * \frac{Pop_{i,t+n}}{Pop_{i,t}} \right] * 100 \quad (\text{Ec. 4})$$

En esta versión, el IEU mide la diferencia entre la ciudad *i* y una ciudad hipotética ideal con un crecimiento de la mancha urbana igual al crecimiento de su población. La unidad representa esta ciudad hipotética. La brecha entre el crecimiento del área y la población de la ciudad *i* respecto a la ciudad hipotética es ponderada por el crecimiento de la población de la propia ciudad *i*. El resultado se expresa en porcentaje. Al igual que en la Ec. (1) y Ec. (2), los valores positivos muestran la presencia de expansión urbana y los valores negativos la existencia de ciudades compactas.

La versión del IEU en la Ec. (4) añade un giro interpretativo a las tres versiones previas, pero no tiene antecedente en la literatura. No hay desarrollos teóricos o empíricos para enriquecer o alimentar esta versión. En lo sucesivo, por simplicidad de cómputo y claridad expositiva, este escrito alude a las versiones en las Ec. (2) y Ec. (3). La Ec. (4) se presenta aquí para señalar que la expansión urbana, medida por cualquiera de estos índices, también puede entenderse en referencia a una ciudad hipotética o ideal. En las cuatro ecuaciones el valor del IEU es el mismo, sólo la interpretación o forma de abordar el tema es diferente.

Una limitación del IEU, expresado en cualquiera de sus cuatro versiones [Ec. (1), Ec. (2), Ec. (3) y Ec. (4)], es que no proporciona ninguna información sobre el tamaño absoluto de la ciudad. En consecuencia, se pueden tener altos valores del IEU para ciudades pequeñas o bajos valores de este índice para las ciudades más grandes. El índice omite la posible influencia que el tamaño o volumen de la población pudiera tener en su estimación. El siguiente ejemplo ilustra este problema.

En el periodo 2000-2010 (t0 a t1), la población de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) se incrementó en 1.0935 (=20,116,842/18,396,677). En este mismo periodo, la superficie urbana aumentó en 1.1090 (=185,291/167,081). Estos cálculos estiman un IEU de la ZMVM de 1.55% (=1.1090-1.0935), un porcentaje que indica la superioridad del crecimiento de la superficie urbana sobre el crecimiento de la población. Las mismas operaciones para Acámbaro, Mich., señalan que la diferencia de tasas es de 61.64%. Por lo tanto, se concluye que el Índice de Expansión Urbana (IEU) de Acámbaro es muy superior al de la ZMVM. Estos datos se contraponen con la idea popular de que las ciudades grandes deberían mostrar mayor expansión. Este asunto sería irrelevante para un analista riguroso al que poco importe la opinión generalizada. Pero los datos de superficie invierten la relevancia porcentual de estas ciudades. La conversión de las tasas previas a hectáreas muestra que el crecimiento de la superficie de la ZMVM (2587 has.) a una tasa relativamente baja (1.55), es muy superior al incremento de Acámbaro (491 has.), a una tasa muy alta (61.04). Es fácil detectar que la diferencia en el crecimiento de las hectáreas en estas dos ciudades no se debe a la tasa de crecimiento sino al tamaño de la superficie urbana al inicio del periodo.

La expansión urbana no debe confundirse con la dinámica urbana, muy común en los estudios descriptivos del proceso de urbanización (Garza, 2003). La estimación de la dinámica urbana es sólo uno de los dos componentes del índice de expansión urbana. El

segundo componente es el crecimiento del área urbana, no considerado en los estudios de dinámica urbana.

La expansión urbana como intensidad absoluta

La elaboración de índices relativos es necesaria para comparar la expansión de las ciudades de distinto tamaño. El Índice de Expansión Urbana (IEU) es una medición relativa de la expansión urbana. El párrafo anterior muestra que la medición relativa tiende a sobredimensionar la expansión urbana en las áreas pequeñas y subestimarla en las áreas grandes. Una manera de lidiar con este problema es convertir los valores relativos en valores absolutos. Este proceso de conversión opera de la siguiente manera. El primer paso en esta tarea de conversión es expresar el IEU de la OECD como una división o resta de fracciones (Ec. 2 o Ec 3). Esta síntesis elimina cálculos innecesarios, genera una expresión algebraica fácil de comunicar y, sobre todo, facilita la adaptación de procesos metodológicos aplicados de otras áreas del análisis regional. Enseguida se calcula el valor esperado del Índice de Expansión Urbana ($\widehat{Urb}_{i,t+n}$), de la siguiente manera:

$$\widehat{Urb}_{i,t+n} = \frac{Pop_{i,t+n}}{Pop_{i,t}} * Urb_{i,t} \quad (\text{Ec. 5})$$

El Apéndice muestra que la estimación del $\widehat{Urb}_{i,t+n}$ se obtiene despejando términos en cualquiera de las dos versiones del Índice de Expansión Urbana (IEU). El Apéndice también muestra que, por sustitución de términos, $\widehat{Urb}_{i,t+n}$ genera un IEU igual a cero o la unidad, según se exprese como sustracción o división de fracciones.⁴

La conversión de la intensidad relativa (IEU) en intensidad absoluta (INAB) ocurre cuando se resta el valor esperado al valor observado al final del periodo:

$$INAB = Urb_{i,t+n} - \widehat{Urb}_{i,t+n}$$

La intensidad absoluta (INAB) es el exceso o déficit que se obtiene al restar las hectáreas esperadas en t+n a las hectáreas observadas en ese mismo año (t+n). La INAB son las hectáreas que sería necesario descontar (si el Índice de Expansión Urbana es superior a uno en el ratio de fracciones) o añadir (si el Índice de Expansión Urbana es inferior a uno) a la superficie de la ciudad en el año inicial para que el Índice de Expansión Urbana sea igual a la unidad en LQ o a cero en la resta de fracciones.⁵

Las ciudades con una mancha urbana observada en el año final ($Urb_{i,t+n}$) superior al valor esperado ($\widehat{Urb}_{i,t+n}$) son expansivas porque la intensidad absoluta resultantes es positiva. El Índice de Expansión Urbana (IEU) en estas ciudades tiene un valor superior a cero en las Ec. (1), (2) y (4) y es mayor que la unidad en la Ec. (3). Por el contrario, si el área de mancha

⁴ El artificio de utilizar el valor esperado como un mecanismo para medir la expansión urbana es utilizado en Ewing en sus distintos trabajos para los EEUU (Ewing y Hamidi, s.f.). Este autor utiliza la regresión por mínimos cuadrados ordinarios (MCO) para determinar el valor esperado del índice de expansión urbana y del índice mismo. Este procedimiento no es apropiado en la perspectiva planteada en esta investigación.

⁵ En la literatura sobre clusters económicos (Fingleton et al., 2004; 2007; y 2008), la intensidad absoluta (INAB) se denomina Cociente de Localización de Aglomeración Horizontal (HCLQ: *Horizontal Clustering Location Quotient*). El HCLQ no es otra cosa que la conversión de la intensidad relativa (INRE o IEU) en intensidad absoluta (INAB). El nombre o acrónimo del HCLQ no tiene ningún sentido en la presente investigación. En la medición de la expansión urbana tiene más significado la expresión "Intensidad Absoluta de la Expansión Urbana". Con el ánimo de referir más apropiadamente la conversión de intensidades, esta investigación utiliza INAB (intensidad absoluta) para referir el HCLQ en la literatura de la concentración económica (Ratanawaraha y Polenske, 2007; Echeverri-Carroll y Ayala, 2010; Rivera, Sheffi y Welsch, 2014; Ersoy, 2016) o, más recientemente, de la distribución espacial del voto (Peres da Silva y Davidian, 2013).

urbana al final del periodo es inferior a $\widehat{Urb}_{i,t+n}$, la ciudad es compacta, con un IEU menor a cero en las Ec. (1), (2) y (4), y es menor a la unidad en la Ec. (3).

De regreso al ejemplo de la ZMVM y Acámbaro. Ya vimos que el crecimiento de la mancha urbana de ZMVM sobrepasó el crecimiento de la población en 1.55%, en el periodo de estudio. Aplicando las fórmulas anteriores, la diferencia entre el crecimiento observado (185,291) y el crecimiento esperado si el área urbanizada hubiera crecido como la población (182,703) es de 2587 has. Es decir, un Índice de Expansión Urbana (IEU) de 1.55% equivale a una Intensidad Absoluta (INAB) de 2587 has. para la ZMVM. Los mismos cálculos para Acámbaro muestran que su IEU de 61.04% equivalen a 491 has. Si sólo se reportara el Índice de Expansión Urbana presentaría un valor muy por encima de la ZMCM. Al convertir este índice en unidades de superficie, obtenemos una medición de la intensidad de la expansión urbana en términos absolutos (INAB). Una vez explicada la lógica del procedimiento, la forma rápida de calcular la intensidad absoluta es simplemente multiplicar el área en el año inicial por la intensidad relativa. En el caso de la ZMVM, $(0.015485 \cdot 167081) = 2587$. En el caso de Acámbaro, $(0.6104 \cdot 805) = 491$ has.

Este ejemplo presentado en dos partes ilustra claramente que el índice de la OECD es una medida de intensidad relativa (tasa porcentual) que debe combinarse con mediciones de magnitud o expresarse en unidades de intensidad absoluta (hectáreas).

Prueba de hipótesis

El primer grupo de preguntas en esta investigación conduce a la hipótesis de que “la conversión de los valores relativos no afecta la jerarquía de la intensidad relativa”. La naturaleza de la pregunta y la asimetría en la distribución de los datos sugieren el uso del coeficiente de correlación de rangos para verificar este planteamiento. El segundo grupo de preguntas surge de la literatura revisada en la formulación de las preguntas de investigación. Los estudios de caso examinados encuentran que “la expansión urbana se manifiesta por igual en las ciudades grandes y chicas”. La hipótesis en este trabajo es que en México se sostienen estos resultados, independientemente de que se utilice la intensidad relativa o absoluta. Las pruebas no-paramétricas Chi-cuadrada y Kruskal-Wallis, por la asimetría usual en la distribución de la expansión urbana, se utilizan para constatar esta presunción. Estas pruebas estadísticas se aplican a las 135 ciudades y, por separado, a las ciudades expansivas y compactas.

El criterio central en las pruebas de hipótesis es el principio estadístico NONO: No-significativa, No se rechaza la hipótesis nula (H_0). En la prueba Chi-cuadrada, la H_0 sostiene que los renglones (expansión urbana) son independientes de las columnas (estratos de tamaño urbano). Si el resultado de la prueba es no-significativo no debe rechazarse H_0 : La expansión urbana es independiente del tamaño de la ciudad. Si el valor de Chi-cuadrada es significativo (p -valor $< 5\%$, el riesgo de rechazar H_0 que sea verdadera) debe concluirse que existe una relación significativa entre estas dos variables (hipótesis alternativa, H_1).

En la prueba Kruskal-Wallis (KW), la hipótesis nula (H_0) es: no hay diferencias significativas en la intensidad de la expansión urbana en los distintos estratos de tamaño de las ciudades. Por el principio NONO (No significativo, No se rechaza H_0), un valor no significativo de la prueba (se utiliza el valor de Chi-cuadrada en vez del valor H de la KW), no rechaza H_0 . Si el valor de Chi-cuadrada es significativo ($p < 5\%$), se concluye que hay diferencias significativas entre la intensidad de la expansión urbana y el tamaño de ciudad.

Estudio de caso

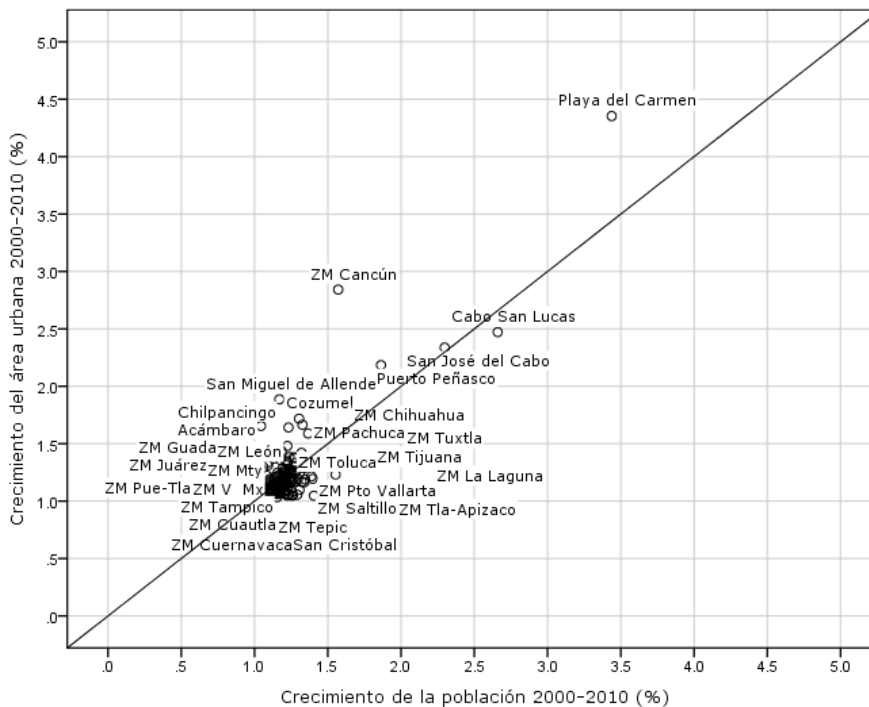
Datos

Esta investigación analiza 135 ciudades mexicanas durante el periodo 2000-2010. Estas ciudades son mayores a 50 mil habitantes en el 2010 y a 30 mil en el 2000. Los resultados sólo son pertinentes para el periodo de estudio, según la información contenida en la base de datos. Los resultados no son necesariamente los mismos antes o después de este periodo o para cálculos realizados con datos y definiciones de áreas urbanas en otras fuentes de información. Los cálculos principales se realizaron con el paquete estadístico IBM SPSS Statistics (v. 23.0) y Microsoft Excel (v. 2003).

Resultados generales

La metodología demuestra que el Índice de Expansión Urbana (IEU) es simplemente el diferencial de dos tasas de crecimiento: la tasa de crecimiento del área urbana y la tasa de la población, en el periodo de estudio. En una gráfica de dispersión de puntos se puede colocar la tasa de crecimiento de la población en el eje X y la tasa del área urbana en el eje Y (Figura 1). La línea de 45° no sólo muestra la distribución que tendrían las ciudades si estas dos tasas crecieran al mismo ritmo sino que las divide en dos grupos; las ciudades expansivas, con un ritmo de crecimiento en su área urbana superior al de su población y las ciudades compactas, en el caso contrario. Entre más se alejen las ciudades de esta línea de igual crecimiento, mayor la diferencia de tasas.

Figura 1. Crecimiento del área urbana y del crecimiento de la población en las 135 ciudades estudiadas, 2000-2010.



Nota: La línea de 45° indica que la tasa de crecimiento de la mancha urbana y la tasa de la población es la misma. Las ciudades expansivas y compactas están por encima o por debajo de esta línea, dependiendo si el crecimiento del área urbana es superior o inferior al crecimiento de la población, respectivamente.

En la Figura 1 destacan cinco ciudades turísticas de playa por los altos ritmos de crecimiento de la población y área urbana. El rápido crecimiento del área urbana de Playa del Carmen, ZM Cancún, Cabo San Lucas, San José del Cabo y Puerto Peñasco ha sido acompañado por un crecimiento también rápido de su población. Mientras en las dos primeras ciudades el diferencial de tasas es muy alto, en las tres últimas ese diferencial es muy bajo (están muy cerca de la línea de 45°). Cabo San Lucas, San José del Cabo y Puerto Peñasco muestran que las ciudades compactas, o cerca de serlo, pueden tener ritmos de crecimiento muy altos en ambas tasas, siempre que su diferencial sea bajo. El Índice de Expansión Urbana (IEU) es la distancia entre la ciudad y la línea de 45° ; no es la distancia entre la ciudad y la intersección de las abscisa-X y la ordenada-Y. Una ciudad con bajo IEU puede ubicarse en el extremo derecho de la Figura 1 y tener un bajo IEU si está en, o cerca de, la línea de 45° . El resto de las ciudades forma una nube más o menos compacta que conviene analizar en términos de la intensidad relativa y absoluta.

Si la intensidad relativa es positiva, la intensidad absoluta también lo es. Esto no significa que la relación entre ambas sea perfecta. La intensidad absoluta es la intensidad relativa multiplicada por el área inicial. En términos de la fórmula respectiva en esta investigación, la intensidad absoluta es simplemente la diferencia entre el área observada y el área esperada (si el área de la ciudad hubiera crecido igual que la tasa de la población). El coeficiente de correlación entre la intensidad absoluta e intensidad relativa es de 0.931, estadísticamente significativo para una probabilidad de 0.01 con dos colas. Esta alta correlación de rangos muestra que la conversión de valores de la intensidad relativa a intensidad absoluta no altera significativamente el orden de la expansión urbana en las ciudades estudiadas. Esta correlación alta no significa que los rangos de las ciudades en una y otra intensidad sea la misma o que el cálculo de la intensidad absoluta sea inútil puesto que no se altera la jerarquía urbana. En el primer caso, la alta correlación muestra que las metrópolis con expansión urbana de intensidad relativa alta también tienen intensidad absoluta alta, no que la jerarquía de las ciudades sea exactamente la misma en ambas intensidades. Por ejemplo, la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), una ciudad de 20 116 842 habitantes en el 2010, ocupa el lugar 53 en la intensidad relativa (1.55 %) pero está en el lugar 4 en intensidad absoluta (2,587 has). El hecho de que ambas intensidades tengan una alta correlación no significa que las ciudades ocupen el mismo rango en una y otra intensidad. En el segundo caso, gracias al cálculo de la intensidad absoluta se pueden identificar las ciudades donde la intensidad relativa subestima o sobrestima los valores de la expansión urbana. La ZMVM ilustra el caso donde la intensidad relativa subestima la expansión urbana. Por otro lado, Playa del Carmen, una ciudad de 149,923 habitantes en el 2010, ocupa el segundo sitio por su intensidad relativa (índice de de expansión urbana de 91.54%) y el 13vo lugar por su intensidad absoluta (685 hectáreas). Esta ciudad ilustra el caso donde la intensidad relativa sobrestima la expansión urbana.

El Cuadro 2 presenta la intensidad absoluta e intensidad relativa de la expansión urbana en las 10 ciudades más expansivas y las 10 ciudades más compactas. Este mismo cuadro incluye los datos de área y población indispensables para el cálculo de ambas intensidades. La ZM de Cancún emerge inmediatamente como la ciudad con mayor expansión urbana (en términos absolutos y relativos) en el sistema de 135 ciudades. El suplemento a este artículo proporciona la información para analizar la sub/sobre estimación de la expansión urbana en las 135 ciudades cuando se utiliza la intensidad relativa. Es preciso recordar que los cálculos reflejan el proceso de densificación de cada ciudad entre los años 2000 y 2010, por lo que no se deben extrapolar resultados más allá del periodo de estudio.

Cuadro 2. Índice de Expansión Urbana (IEU), Intensidad Absoluta (INAB) y Población y Área en las diez ciudades más expansivas y más compactas de México, según la INAB, 2000-2010.

Ciudad	IEU	INAB	Área (has.)		Población (habs.)	
	2000-2010		2000	2010	2000	2010
Las 10 ciudades más expansivas						
ZM Cancún	127.15	5,520	4,341	12,340	431,128	677,379
ZM Juárez	22.07	4,339	19,661	25,828	1,218,817	1,332,131
ZM Chihuahua	25.59	3,362	13,136	19,441	696,495	852,533
ZMVM	1.55	2,587	167,081	185,291	18,396,677	20,116,842
ZM Acapulco	24.55	2,395	9,755	13,036	791,558	863,431
ZM Pachuca	22.33	1,768	7,918	12,582	375,022	512,196
ZM León	11.35	1,399	12,327	17,031	1,269,179	1,609,504
ZM Mexicali	9.94	1,334	13,424	17,782	764,602	936,826
ZM La Laguna	6.73	1,004	14,904	18,993	1,007,291	1,215,817
ZM Guadalajara	2.20	875	39,795	48,585	3,699,136	4,434,878
Las 10 ciudades más compactas						
ZM de Tehuacán	-18.09	-1,111	6,140	6,469	240,507	296,899
ZM Cuernavaca	-9.74	-1,603	16,454	17,450	798,782	924,964
ZM Pto Vallarta	-32.23	-1,634	5,070	6,242	244,536	379,886
ZM Tijuana	-10.36	-2,319	22,380	26,672	1,352,035	1,751,430
ZM Toluca	-8.04	-2,407	29,928	35,208	1,540,452	1,936,126
ZM Tuxtla	-20.93	-2,697	12,887	14,145	523,482	684,156
ZM Monterrey	-6.94	-3,819	55,035	63,018	3,381,005	4,106,054
ZM Tlax-Apizaco	-17.42	-4,089	23,478	24,630	408,401	499,567
ZM Saltillo	-23.63	-4,293	18,171	19,177	637,273	823,128
ZM Pue-Tlaxcala	-11.94	-6,761	56,619	61,301	2,269,995	2,728,790

Fuente: Estimaciones propias y SEDESOL (2012). Cuadro completo para las 135 ciudades en el suplemento de este escrito.

Considerando la intensidad absoluta, las ZM de Saltillo y Puebla-Tlaxcala son las ciudades más compactas. Sorprende que la Zona Metropolitana de Monterrey aparezca entre las ciudades más compactas. No se considera la adición de nuevos municipios a la periferia urbana al norte de la zona metropolitana por expansión de la mancha urbana y por introducción de obras de infraestructura urbana para el asentamiento de industrias y desarrollos inmobiliarios. En este caso, el resultado para la ZM de Monterrey podría interpretarse de la siguiente manera: “hasta el año 2010, antes de la integración física y funcional de los municipios aledaños y la construcción de infraestructura urbana que alentó la expansión de la ciudad hacia el norte de su periferia, la metrópoli mostraba un crecimiento compacto”.⁶ Una observación similar aplicaría a ciudades donde ocurra un proceso análogo de expansión urbana.

En general, hay más ciudades compactas que expansivas. Sesenta y uno de las 135 ciudades en el estudio son expansivas (45%). Las 74 ciudades restantes son compactas (55%). La expansión urbana está presente en todas las ciudades de todos los tamaños. Sin embargo, la presencia de las ciudades expansivas domina en el estrato alto (55% en las ciudades con más de un millón de habitantes) y el estrato menor de población (60% en las ciudades entre

⁶ Datos recientes de la Secretaría de Desarrollo Sustentable del Estado de Nuevo León reportan que la Zona Metropolitana de Monterrey al año 2015, tenía un área de 100 mil hectáreas y una población de 4,659,661 habitantes (Russildi, 2016). Esta información genera un Índice de Expansión Urbana de 45.2 % en el periodo 2010-2015, muy superior al - 6.94 % estimado en esta investigación para el periodo 2000-2010. Esta estimación confirma el alto grado de expansión urbana de la ZM de Monterrey en los últimos cinco años.

50 mil y 100 mil habitantes). Las ciudades compactas dominan en los estratos intermedios (65% en las ciudades entre 100 mil y 500 mil habitantes y 59% en las ciudades entre 500 mil y un millón de habitantes) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Expansión urbana por estrato de ciudad, 2010.

Ciudad por tipo de expansión urbana	Población en ciudades									
	Mayores a un millón		Mayores a 500 mil pero menores a un millón		Mayores a 100 mil pero menores a 500 mil		Mayores a 50 mil pero menores a 100 mil		Total	
	No- de cds	%	No- de cds	%	No- de cds	%	No- de cds	%	No- de cds	%
Expansivas	6	54.55	9	40.91	22	35.48	24	60.00	61	45.19
Compactas	5	45.45	13	59.09	40	64.52	16	40.00	74	54.81
	11	100.00	22	100.00	62	100.00	40	100.00	135	100.00

Fuente. Cálculos propios.

Prueba de hipótesis

La intensidad absoluta no es magnitud absoluta (MAG), aunque las dos se expresen en hectáreas. La intensidad absoluta tiene su origen en la intensidad relativa y refiere el número de hectáreas que sería necesario añadir o quitar para que el crecimiento del área urbana sea igual al crecimiento de la población de la ciudad. Este dato es muy distinto del área misma de la ciudad (MAG). La primera hipótesis en este escrito sostiene que la conversión de los valores relativos en valores absolutos proporciona una medición que no altera la jerarquía establecida por la intensidad relativa. No hay antecedentes en la literatura sobre el cálculo de la intensidad absoluta. Por lo tanto, no hay bases empírico-conceptuales para suponer una relación de algún tipo entre la intensidad relativa y la intensidad absoluta. La base de este planteamiento hipotético es puramente operativa, en base a cálculos preliminares con el Índice de Expansión Urbana (IEU). La Figura 1 muestra que hay muy pocas ciudades alejadas de la línea de 45°. Por su distancia a esta línea, hay pocas ciudades pequeñas para sobrevalorar o grandes para subestimar. El estadístico z-MAD para el IEU en las 135 ciudades detecta sólo ocho ciudades expansivas atípicas (ZM Cancún, Playa del Carmen, San Miguel de Allende, Acámbaro, Cozumel, Huajuapán de León, Chilpancingo y Puerto Peñasco) y dos ciudades compactas atípicas (ZM Puerto Vallarta y San Cristóbal). En estas ciudades el valor z-MAD es mayor a |3.5|. El resultado puede cambiar si se calcula z-MAD de manera independiente para las ciudades expansivas y compactas.

La asimetría en la distribución de los datos sugiere el uso del coeficiente de correlación de rangos para verificar la hipótesis sobre el escaso efecto de la conversión de los datos absolutos en la jerarquía de los valores relativos. El resultado en la Cuadro 4 confirma la hipótesis puesto que el coeficiente de correlación entre la intensidad relativa e intensidad absoluta es muy alto (0.931, $p=0.000$).

Cuadro 4. Correlación de Spearman para la intensidad relativa (INRE), intensidad absoluta (INAB) y población (POB), considerando 135 ciudades de México.

	POB	INAB	INRE
POB	1.000	-0.143 (0.098)	-0.118 (0.173)
INAB		1.000	0.931** (0.000)

Significancia entre paréntesis, para 2 colas. Los coeficientes con $p < 1\%$ indicados con doble asterisco.

Por otro lado, la segunda hipótesis supone que la expansión urbana existe lo mismo en ciudades grandes que chicas, usando valores relativos (como en los casos revisados en la formulación de hipótesis) o absolutos (no registrados por la literatura). Al considerar las 135 ciudades, el coeficiente de correlación de rangos confirma que el tamaño (la población, Pob) no tiene nada que ver con la expansión urbana, en términos relativos (INRE) o absolutos (INAB) (Cuadro 4). El coeficiente de correlación de la población (POB) con la intensidad relativa (INRE) es negativo y no significativo ($r_s = -0.118$, $p = 0.173$, con dos colas). Un resultado similar se obtiene para la correlación entre la población y la INAB ($r_s = -0.143$, $p = 0.098$, con dos colas). Como en los estudios para los EEUU con mediciones de intensidad relativa (Lopez y Hynes, 2003; Hamidi et al., 2015), la expansión urbana en México, medida en términos relativos y absolutos, ocurre lo mismo en las ciudades grandes que en las pequeñas.

La prueba Chi-cuadrada, colapsando los dos estratos más altos para incrementar el número de ciudades en esas celdas (Cuadro 5), no es significativa. Se acepta la hipótesis nula (H_0) de independencia entre tamaño de la ciudad y forma urbana (Chi-cuadrada = 5.901, $DF = 2$, $P = 0.052$). Este resultado sugiere que no existe relación entre la población dividida en estratos, en base a la frecuencia de ciudades por celda, y el tipo de ciudad (expansiva o compacta). El tamaño de la ciudad no tiene nada que ver con la modalidad de su expansión física (compacta o expansiva). Esta conclusión es consistente con el resultado obtenido mediante el coeficiente de correlación: no hay relación entre el tamaño de población y el tipo de expansión urbana. La expansión urbana, medida en términos relativos o absolutos, ocurre en las ciudades de todo tamaño.

La prueba Chi-cuadrada previa no toma en cuenta el valor específico de la intensidad urbana en cada una de las ciudades agrupadas por estrato de tamaño. Para cubrir esta deficiencia se reorganizan los datos para aplicar una prueba Kruskal-Wallis (KW). Esta prueba verifica si hay un efecto del tamaño de la población, agrupada en estratos (variable independiente), sobre la intensidad relativa o absoluta en la expansión urbana (variable dependiente). La prueba Kruskal-Wallis primero se aplica al conjunto de las 135 ciudades; después, por separado, a las 61 ciudades expansivas y las 74 ciudades compactas. Los resultados de la prueba KW son los siguientes (Cuadro 6):

(a) Significativa (se rechaza la H_0 de que la distribución de la intensidad es la misma para los distintos estratos de tamaño de población). Hay diferencia significativa entre la intensidad de los distintos estratos de población, en:

- 135 Ciudades (Valores Relativos).
- 61 Ciudades expansivas (Valores Absolutos).
- 74 Ciudades compactas (Valores Absolutos).

(b) No significativa. Se acepta H_0 : la intensidad es la misma en los distintos tamaños de población, en:

- 135 Ciudades (Valores Absolutos).

- 61 Ciudades expansivas (Valores Relativos).
- 74 Ciudades compactas (Valores Relativos).

Cuadro 5. Prueba Chi-cuadrada para el número de ciudades expansivas y compactas por estrato de tamaño.

Ciudades	Estrato			Total
	Alto	Medio	Bajo	
Expansivas	15 (14.91)	22 (28.01)	24 (18.07)	61
Compactas	18 (18.09)	40 (33.99)	16 (21.93)	74
Total	33	62	40	135

Valor esperado entre paréntesis.

Chi-cuadrada de Pearson = 5.901, DF = 2, P-Value = 0.052

Chi-cuadrada del Likelihood Ratio = 5.932, DF = 2, P-Value = 0.052

Fuente: Cálculos propios en base a Cuadro 3.

En breve, al considerar estratos de distinto tamaño de población, cuando se acepta H_0 en la intensidad relativa, se rechaza en la intensidad absoluta, y viceversa. Considerando que la intensidad absoluta es la intensidad relativa “mejorada” por expresarse en valores absolutos, esta ambigüedad de resultados debe resolverse a favor de la prueba de hipótesis para la intensidad absoluta: No existen diferencias significativas en la intensidad absoluta de las 135 ciudades estudiadas, agrupadas en tres estratos de tamaño de población. Existen, sin embargo, diferencias significativas en la intensidad absoluta de las 61 ciudades expansivas, agrupadas en los tres estratos de población. Estas diferencias también son significativas para las 74 ciudades compactas.

En suma, la hipótesis de investigación de que, al igual que en los EEUU, la expansión urbana en México se manifiesta por igual en las ciudades de cualquier tamaño se confirma para valores relativos y absolutos. El coeficiente de correlación confirma la hipótesis para el agregado de las 135 ciudades. Al clasificar las ciudades por estratos de población, la prueba Kruskal-Wallis confirma la hipótesis de que la expansión urbana ocurre en las urbes de cualquier tamaño sólo para los valores absolutos de las 135 ciudades. Esta hipótesis se sostiene para los valores relativos de las 61 Ciudades expansivas y en las 74 Ciudades compactas.

En ninguna de las 135 ciudades la población disminuye. No hay casos donde la mancha urbana crezca mientras la población disminuya (expansión atípica), ni casos donde la mancha urbana se detenga mientras la población disminuya (encogimiento de las ciudades, *shrinking cities*).

Cuadro 6. Prueba Kruskal-Wallis para la expansión urbana en tres estratos de tamaño de las ciudades.

Intensidad (relativa o absoluta) general y por tipo de ciudad	Estratos de tamaño de las ciudades			Chi-cuad. g.l. Sig. Asint.	H0: la intensidad es igual en los tres estratos.
	Mayores a 50 mil pero menores a 100 mil (1)	Mayores a 100 mil pero menores a 500 mil (2)	Mayores a 500 mil (3)		
135 Ciudades Valores Relativos	40 (79.26)	62 (59.33)	33 (70.64)	6.512 2 0.039	X
135 Ciudades Valores Absolutos	40 (79.25)	62 (60.02)	33 (69.35)	5.9 2 0.052	✓
61 Ciudades expansivas Valores Relativos	24 (33.08)	22 (26.64)	15 (34.07)	2.107 2 0.349	✓
61 Ciudades expansivas Valores Absolutos	24 (22.58)	22 (26.95)	15 (50.40)	24.451 2 0.000	X
74 Ciudades compactas Valores Relativos	16 (37.53)	40 (36.61)	18 (39.44)	0.215 2 0.898	✓
74 Ciudades compactas Valores Absolutos	16 (53.25)	40 (37.51)	18 (23.47)	16.241 2 0.00	X

Fuente: Cálculos propios.

Nota. Las celdas de los rangos de tamaño contienen los casos, en el primer renglón, y el rango promedio, entre paréntesis.

Simbología: ✓ = Retiene H0; X = Rechaza H0.

La hipótesis nula (H0) es evaluada bajo el principio NONO: No significativo, No se rechaza H0.

Análisis y discusión

Conviene repasar los siguientes términos utilizados en la investigación antes de reportar, analizar y discutir el resultado para la primera de hipótesis. La intensidad absoluta no es magnitud absoluta, aunque las dos se expresen en hectáreas. La intensidad absoluta tiene su origen en la intensidad relativa y refiere el número de hectáreas que sería necesario añadir o quitar para que el crecimiento del área urbana sea igual al crecimiento de la población de la ciudad. Este dato es muy distinto del área misma de la ciudad.

La magnitud, al igual que la intensidad, se mide en valores absolutos o relativos. El valor absoluto de la magnitud es simplemente el número observado de hectáreas de la ciudad, al inicio o al final del periodo. No se debe confundir la magnitud con el valor absoluto de la intensidad que se mide al final del periodo. La magnitud en términos relativos es un porcentaje global directo: Se mide de manera similar al inicio o final del periodo. La importancia porcentual de una ciudad en el área de todas las ciudades del sistema urbano nacional es un ejemplo de magnitud relativa.

Si la intensidad relativa es positiva, la intensidad absoluta también lo es. Esto no significa que la relación entre ambas sea perfecta. La investigación muestra que la correlación entre la intensidad relativa e intensidad absoluta es de 0.931, estadísticamente significativa para una probabilidad de 0.01 con dos colas. Este resultado confirma la primera hipótesis: la

conversión de valores no altera significativamente la jerarquía de la expansión urbana previamente indicada por la intensidad relativa. La investigación muestra que la confirmación de esta hipótesis no implica que el rango de las ciudades sea exactamente el mismo en ambas intensidades o que el cálculo de la intensidad absoluta sea inútil puesto que no se altera la jerarquía urbana. La correlación entre la intensidad relativa e intensidad absoluta no es perfecta e indica la presencia de sobrevaloración/subestimación de valores. La estimación de la intensidad absoluta (en hectáreas) permite identificar cada una de las ciudades donde la intensidad relativa (en tasa porcentual) subestima o sobrestima la expansión urbana de las ciudades.

La segunda hipótesis supone que la expansión urbana es un fenómeno que ocurre lo mismo en las ciudades pequeñas que en las grandes. En la literatura actual no hay registro sobre el cálculo de la intensidad absoluta de la expansión urbana. El cálculo de esta variable es una aportación metodológica de este trabajo. Al efecto se manipula y sintetiza el Índice de Expansión Urbana de la OECD para importar el concepto de intensidad absoluta desde la identificación de clusters en análisis económico regional. Todas las hipótesis en la literatura sobre la expansión urbana se fincan sobre la intensidad relativa, generalmente calculada para ciudades más o menos del mismo tipo (áreas metropolitanas), sin mayor desagregación o estratificación. La hipótesis nula (H_0) en esta investigación es: la expansión urbana esta presente en todas las ciudades, independientemente de su tamaño. El estudio de caso considera ciudades de tamaño diverso, con los siguientes resultados:

— Hipótesis basada sólo en la literatura (valores de intensidad relativa): la expansión urbana en el grupo agregado de las 135 ciudades de México se manifiesta en las ciudades de cualquier tamaño. Este resultado lo confirma el bajo coeficiente de correlación de rangos (no significativo) entre población e intensidad relativa.

— Hipótesis basada en el número de ciudades expansivas y compactas estratificadas por tamaño de población (no registrada en la literatura): Prueba Chi-cuadrada no significativa. El tamaño de la ciudad no tiene nada que ver con la modalidad de su expansión física. Este resultado es consistente con el resultado del coeficiente de correlación de rangos entre población e intensidad relativa.

— Hipótesis basada en valores de intensidad absoluta (no registrada en la literatura). Hipótesis nula: no existen diferencias significativas en la intensidad absoluta de la expansión urbana de las ciudades agrupadas en tres estratos de tamaño de población. Esta hipótesis se confirma para el agregado de las 135 ciudades, pero se rechaza para las 61 ciudades expansivas y las 74 ciudades compactas. Este resultado lo reporta la prueba Kruskal-Wallis.

— Hipótesis de igual intensidad relativa para las ciudades estratificadas por tamaño de población (no registrada en la literatura): La hipótesis se sostiene para las 51 ciudades expansivas y las 71 ciudades compactas, pero no se sostiene para las 135 ciudades. Este resultado lo confirma la prueba Kruskal-Wallis.

En suma, las hipótesis registradas en la literatura sobre intensidad relativa se confirman: La expansión urbana está presente en las ciudades expansivas o compactas de cualquier tamaño. No hay registro en la literatura de las hipótesis sobre intensidad absoluta de la expansión urbana porque el concepto apenas se introduce en esta investigación. La prueba Kruskal-Wallis para la intensidad absoluta (recomendada en esta investigación) sólo acepta la hipótesis nula (H_0) de igual intensidad absoluta para el universo de las 135 ciudades, estratificadas por tamaño de población.

La relevancia de este trabajo puede desglosarse siguiendo el orden de sus cuatro tareas más importantes: (a) Elabora una clasificación de la literatura sobre expansión urbana; (b) Evalúa y sintetiza el Índice de Expansión Urbana (IEU) de la OECD en expresiones alternativas de cálculo con variantes interpretativas; (c) Calcula el valor del IEU para todas y

cada una de las ciudades y propone una medida correctiva al índice: la conversión de la intensidad relativa en intensidad absoluta; y (d) Prueba las hipótesis de trabajo.

— La revisión conceptual en la primera tarea es muy importante para perfilar el área de investigación sobre la expansión urbana y ubicar la variedad de los estudios que abordan parcialmente este campo temático. Una investigación multivariada no garantiza que se capture la naturaleza multidimensional de la expansión urbana si sólo incluye, por ejemplo, variables sobre forma física en un sistema cualquiera de ciudades. En este caso quedarían por cubrirse la accesibilidad vial, la densidad, la centralidad y policentricidad, por mencionar las dimensiones sobre las que hay acuerdo en la literatura. Esta observación no invalida los estudios que abordan parcialmente la expansión urbana. Sólo señala que la variedad temática del campo demanda que las investigaciones adviertan explícitamente la naturaleza multidimensional del fenómeno e indiquen la naturaleza parcial o fraccionada de los estudios.

— La síntesis del Índice de Expansión Urbana (IEU) reduce los cálculos algebraicos en la segunda tarea, favorece la claridad expositiva del índice y propicia el uso de conceptos en otros campos del análisis urbano-regional al convertir la intensidad relativa en intensidad absoluta. La aplicación de cualquiera de estas dos medidas, el IEU o su correlato en términos absolutos, clasifica naturalmente las ciudades en expansivas (índice positivo) y compactas (índice negativo).

— Presenta los resultados de la prueba de hipótesis basadas en la literatura sobre expansión urbana y en el propio desarrollo de esta investigación.

Antes de concluir es prudente reconocer los límites de esta investigación. La primera observación importante es que la expansión urbana no es un proceso unidimensional. Aunque la medición en este trabajo considera la intensidad y magnitud en términos absolutos y relativos queda fuera del estudio una serie de índices sobre la centralidad, densidad y accesibilidad urbana. La inclusión de estas características está fuera del alcance de esta investigación. El estudio de la expansión urbana como un fenómeno multidimensional queda por ahora como una asignatura pendiente en México.

Otra limitación es la selección del año base. Los patrones del crecimiento urbano (en términos de población y superficie) están en constante flujo. La selección de cualquier año base inevitablemente genera ruido en los resultados obtenidos. Además, los límites de la ciudad también cambian con el tiempo generando desfase en los resultados del estudio y contradicciones en la percepción actual del público en general.

Los índices en esta investigación no dicen nada sobre las bondades o males de la expansión urbana. En algunos casos esta expansión puede estar acompañada del deseo de los residentes de vivir en la periferia, lejos del centro congestionado y decadente. En otros, casos puede resultar en la destrucción de áreas naturales (manglares o zonas de reserva ecológica), agotamiento de mantos freáticos, contaminación del aire y congestión vial.

A pesar de estas limitaciones, el índice de expansión sintetizado y convertido en intensidad absoluta es una medición precisa, aplicable y replicable con los datos disponibles y proporciona una noción de tamaño, rango o jerarquía de la expansión urbana.

Conclusiones y notas finales

La presentación del estado del arte culmina con una clasificación de la literatura sobre los indicadores de la expansión urbana. Esta clasificación no sólo ubica conceptualmente el índice de expansión urbana utilizado en el presente trabajo sino que también es un marco empírico-conceptual para entender los estudios actuales y una referencia para investigaciones futuras.

Todas las investigaciones revisadas, en general, y el Índice de Expansión Urbana (IEU) de la OECD, en particular, utilizan valores relativos para medir y comparar la expansión urbana

en ciudades de tamaño distinto. Las mediciones relativas son de naturaleza variada. La expansión urbana medida por el diferencial de tasas de crecimiento de la población y el área urbana, propuesta por el IEU, agranda los números chicos y empequeñece los grandes. Por ejemplo, el 5% de mil (50) no es lo mismo que el 5% de un millón (50 mil).

Los cuatro índices reportados en esta investigación, el Índice de Expansión Urbana (IEU) de la OECD (Ec. 1) y las tres versiones adicionales identificadas en esta investigación por las Ecuaciones (2), (3) y (4), arrojan el mismo valor de intensidad relativa, con distinto enfoque interpretativo. Estos tres índices adicionales, sus relaciones entre sí y con el IEU de la OECD, son una aportación metodológica de este trabajo.

Esta investigación, utilizando 135 ciudades mexicanas, advierte que es necesario incorporar el tamaño de la superficie urbana al inicio del periodo en la medición de la expansión urbana. De no ser así, la medición por índices de intensidad relativa (INRE), como el Índice de Expansión Urbana (IEU) de la OECD y sus variantes en este estudio, puede resultar en valores altos para ciudades pequeñas o valores bajos en las ciudades más grandes. Para resolver este problema, el trabajo sugiere la conversión de valores relativos en absolutos. Una vez hechas las comparaciones en términos relativos, el índice de expansión urbana se traduce a hectáreas para expresarlo como intensidad absoluta. En esta sucesión de operaciones, la intensidad relativa y la intensidad absoluta son complementarias porque la primera es condición *sine qua non* de la segunda. El proceso de estimación de la intensidad absoluta así lo exige puesto que su cálculo se deriva de la fórmula de la intensidad relativa. Una siempre puede expresarse en términos de la otra. Ambas intensidades son complementarias, no sustitutas, equivalentes o intercambiables.

La conversión de la intensidad relativa en intensidad absoluta favorece la explicación coherente al incluir el tamaño inicial de las ciudades. Esta investigación sugiere que los procedimientos aplicados y los resultados obtenidos en este trabajo podrían replicarse en la medición y estudio de la expansión urbana en distintas ciudades del mundo. Esta iniciativa podría arrojar resultados interesantes porque hasta ahora sólo se han aplicado mediciones relativas de la expansión urbana. La conversión de la intensidad relativa en intensidad absoluta en el contexto de la expansión urbana también es una aportación metodológica de este estudio.

La articulación temática y los resultados obtenidos en esta investigación pueden servir como guía conceptual o marco empírico para estudios que incluyan una perspectiva multidimensional a escala nacional o internacional. Los temas potenciales de investigación son muy conocidos: impacto de la expansión urbana en los niveles de contaminación urbana y medio de transporte, acceso a vivienda, productividad de las actividades urbanas, obesidad, por mencionar los más comunes.

A la lista anterior pueden agregarse dos anotaciones de carácter general: (a) La metodología y los resultados del trabajo pudieran ser útiles al equipo de la OECD que elaboró el IEU y que alimenta la base de datos internacional. (b) Las observaciones en esta investigación pudieran ser una referencia para la elaboración de los reportes de país de esa organización o para los usuarios actuales y potenciales de la base de datos.

Finalmente, la utilidad del estudio de la expansión urbana también está presente en las investigaciones temáticas, especialmente en salud y otros problemas sociales (Hamidi et al., 2015). La medición y análisis de la expansión urbana tiene una nutrida historia en los estudios sobre salud y otros problemas sociales, tales como accidentes de tráfico, sedentarismo urbano, obesidad, enfermedades cardiovasculares, cáncer, temperaturas extremas, uso de energía residencial, capital social, tiempos de respuesta ante emergencias urbanas, contaminación del aire, distancias, tiempos y demoras en los traslados cotidianos (trabajo, compras, recreación

urbana). La expansión urbana en la mayoría de estos estudios tiene una connotación negativa, aunque hay excepciones (Kahn, 2006; Holcombe y Williams, 2012).

En el futuro inmediato sobresalen, al menos, cuatro líneas posibles de investigación que pueden desprenderse de (integrarse a) la expansión urbana:

1. Comparación de resultados obtenidos con índices elaborados con otras metodologías e indicadores. Por ejemplo, la metodología de Ewing (en Hamidi et al., 2015) es la más completa y puede aplicarse a los indicadores en el Cuadro 1.
2. Elaboración de estudios con indicadores individuales sobre policentricidad, identificación de centros y subcentros urbanos, gradientes de densidad.
3. Estudios que relacionen la expansión urbana con variables, como (posibles fuentes de información entre paréntesis): Muertes por accidentes relacionados con transporte (IMCO, 2014); Contaminación del aire (OECD webpage); M³ combustibles / millón de PIB (IMCO, 2014); Consumo diesel/10 mil hab/km carretera IMCO, 2014); Producto Interno Bruto (PIB) per cápita del 2005 (pesos a precios de 1993), en CONAPO (2014); Porcentaje de deuda pública con respecto a los ingresos públicos municipales de 2009 a 2012 (CONAPO, 2014); Número de unidades de transporte de pasajeros 2012 / Población total (CONAPO, 2014); Especialización económica; y Calidad de vida (CONAPO, 2014).
4. Análisis comparativo de la expansión urbana en México versus las ciudades en los EEUU, Europa (este y oeste) y el resto de Latino América. Base de datos y base empírico-conceptual en <http://stats.oecd.org/> [consulta: 15 de mayo de 2016].

En síntesis, esta investigación destaca cuatro aspectos sobre la expansión urbana: (i) Una propuesta metodológico-interpretativa para organizar los conceptos e índices de medición, (ii) una estrategia metodológica para evitar la sobrevaloración/subestimación de la medición de la intensidad relativa, (iii) la verificación de hipótesis para el caso mexicano, y (iv) un lista de tareas factibles de realizar con información limitada.

Apéndice metodológico-algebraico

1. El Índice de Expansión Urbana (IEU) sugerido por la OECD (Brezzi y Veneri, 2015) puede sintetizarse de la siguiente manera:

$$IEU_i = \frac{[Urb_{i,t+n} - (Urb_{i,t} * (Pop_{i,t+n} / Pop_{i,t}))]}{Urb_{i,t}} * 100 \quad (Ec.1)$$

$$= \frac{Urb_{i,t+n}}{Urb_{i,t}} - \frac{Urb_{i,t} * (Pop_{i,t+n} / Pop_{i,t})}{Urb_{i,t}} = \left(\frac{Urb_{i,t+n}}{Urb_{i,t}} - \frac{Pop_{i,t+n}}{Pop_{i,t}} \right) * 100 \quad (Ec.2)$$

El IEU también puede expresarse como una división de fracciones (del tipo LQ: cociente de localización):

$$IEU_i = \left(\frac{\frac{Urb_{i,t+n}}{Urb_{i,t}}}{\frac{Pop_{i,t+n}}{Pop_{i,t}}} \right) * 100 \quad (Ec.3)$$

La (Ec. 3) también puede expresarse en términos de la distancia a una ciudad ideal, ponderada por el crecimiento demográfico local:

$$IEU_i = \left[\left(\frac{\frac{Urb_{i,t+n}}{Urb_{i,t}}}{\frac{Pop_{i,t+n}}{Pop_{i,t}}} - 1 \right) * \frac{Pop_{i,t+n}}{Pop_{i,t}} \right] * 100 \quad (Ec.4)$$

En esta ecuación, la unidad representa a la ciudad ideal, indicando que en ella el área crece al mismo ritmo de la población. Otra forma de expresar la (Ec.4) es la siguiente:

$$IEU_i = \left(1 - \frac{1}{\frac{\frac{Urb_{i,t+n}}{Urb_{i,t}}}{\frac{Pop_{i,t+n}}{Pop_{i,t}}}} \right) * \frac{Urb_{i,t+n}}{Urb_{i,t}} ; \quad (Ec.5)$$

Interpretación (en base al término entre paréntesis): Si la proporción de área y población en *i* son iguales, IEU_{*i*} es igual a cero, indicando que no hay expansión urbana. Si la proporción de área es mayor que la de la población, el denominador se incrementa y la fracción que se resta de la unidad disminuye (es menor a uno). Esto indica que hay expansión urbana puesto que el IEU_{*i*} es mayor a cero. Por el contrario, si la proporción de población es mayor que la del área,

la fracción que se resta de la unidad aumenta (es mayor a uno). Esto indica que hay consolidación urbana puesto que el IEU_i es negativo.

Sustituyendo términos, realizando las operaciones indicadas y reduciendo lo que corresponda en la (Ec.5), se llega a la (Ec.2):

$$(Ec.5) = (Ec.2) = \frac{Urb_{i,t+n}}{Urb_{i,t}} - \frac{\frac{Urb_{i,t+n}}{Urb_{i,t}}}{\left(\frac{Urb_{i,t+n}}{Urb_{i,t}} \right) \left(\frac{Pop_{i,t+n}}{Pop_{i,t}} \right)} = \frac{Urb_{i,t+n}}{Urb_{i,t}} - \frac{\cancel{Urb_{i,t+n}} \cancel{Pop_{i,t+n}}}{\cancel{Urb_{i,t}} \cancel{Pop_{i,t}}} = \frac{Urb_{i,t+n}}{Urb_{i,t}} - \frac{Pop_{i,t+n}}{Pop_{i,t}} \quad (Ec.2)$$

También es posible elaborar una versión multiplicativa del Índice de Expansión Urbana (IEU) en base a la división de fracciones en la (Ec. 3):

$$IEU_i = \frac{Urb_{i,t+n}}{Urb_{i,t}} \cdot \frac{Pop_{i,t}}{Pop_{i,t+n}} \quad (Ec.6)$$

En suma, las ecuaciones (Ec. 1), (Ec. 2), (Ec. 4) y (Ec. 5) generan el mismo valor del IEU_i, aunque la interpretación varía con la formulación utilizada. La excepción en estas ecuaciones es la (Ec. 5) que debe interpretarse como la (Ec. 2) (ver texto del escrito). La (Ec. 2) también puede expresarse como una división o multiplicación de fracciones (Ec. 3 y Ec. 6, respectivamente), como un cociente de localización (LQ). La mejor interpretación de las ecuaciones (Ec. 3) y (Ec. 6) es la formulación en la Ec. 2, pero el valor de referencia es la unidad en vez del cero.

El estudio manifiesta la posibilidad de las (Ec. 5) y (Ec. 6) pero las omite en el cuerpo principal del texto porque la glosa de la primera es redundante (Ec. 2 = Ec. 5) y la descripción de la segunda es difícil de interpretar y no aporta nada que no sea considerado en la versión tipo LQ (Ec. 3). Estas versiones, además, no tienen antecedente teórico ni empírico en ciencia regional que pudiera aprovecharse en el estudio de la expansión urbana. La formulación de las ecuaciones (Ec. 1) a (Ec. 4) encuentra respaldo en la literatura que utiliza el índice de Hoover o el LQ.

2. El Valor Esperado de la superficie $\widehat{Urb}_{i,t+n}$ se obtiene despejando términos en cualquiera de las dos versiones del Índice de Expansión Urbana (IEU). En la sustracción de fracciones:

$$IEU_i = \frac{Urb_{i,t+n}}{Urb_{i,t}} - \frac{Pop_{i,t+n}}{Pop_{i,t}}$$

Igualando a cero para que $Urb_{i,t+n}$ se convierta en $\widehat{Urb}_{i,t+n}$ (el valor que hace posible esa igualdad) y despejando el término de la derecha, tenemos:

$$\frac{\widehat{Urb}_{i,t+n}}{Urb_{i,t}} = \frac{Pop_{i,t+n}}{Pop_{i,t}}$$

Despejando el denominador del término de la izquierda:

$$\widehat{Urb}_{i,t+n} = \frac{Pop_{i,t+n}}{Pop_{i,t}} * Urb_{i,t}$$

La intensidad absoluta (INAB) es el número de hectáreas excedentes (faltantes) para que el Índice de Expansión Urbana (IEU) sea igual a cero (a uno si se utiliza el LQ). En el IEU expresado como resta de fracciones es el porcentaje que excede a cero; si es expresado como un ratio de fracciones (LQ), es el porcentaje por encima de la unidad.

En esta expresión, $\widehat{Urb}_{i,t+n}$ es igual al valor que genera un Índice de Expansión Urbana (IEU) igual a cero, tal como lo muestra la siguiente sustitución de términos:

$$IEU_i = \frac{Urb_{i,t+n}}{Urb_{i,t}} - \frac{Pop_{i,t+n}}{Pop_{i,t}}$$

Sustituyendo $Urb_{i,t+n}$ en el numerador en el término de la izquierda por $\widehat{Urb}_{i,t+n}$, tenemos:

$$IEU_i = \frac{\frac{Pop_{i,t+n} * Urb_{i,t}}{Pop_{i,t}}}{\cancel{Urb_{i,t}}} - \frac{Pop_{i,t+n}}{Pop_{i,t}} = \frac{Pop_{i,t+n}}{Pop_{i,t}} - \frac{Pop_{i,t+n}}{Pop_{i,t}} = 0$$

De manera similar, en la división de fracciones tenemos:

$$IEU_i = \frac{\frac{Urb_{i,t+n}}{Urb_{i,t}}}{\frac{Pop_{i,t+n}}{Pop_{i,t}}}$$

Sustituyendo $Urb_{i,t+n}$ por $\widehat{Urb}_{i,t+n}$, tenemos:

$$IEU_i = \frac{\frac{Urb_{i,t+n}}{Urb_{i,t}}}{\frac{Pop_{i,t+n}}{Pop_{i,t}}} = \frac{\frac{\frac{Pop_{i,t+n} * Urb_{i,t}}{Pop_{i,t}}}{\cancel{Urb_{i,t}}}}{\frac{Pop_{i,t+n}}{Pop_{i,t}}} = \frac{Pop_{i,t+n}}{Pop_{i,t}} = 1$$

3. Demostración de que la intensidad absoluta (INAB) es igual a la intensidad relativa (medida por el Índice de Expansión Urbana, IEU) multiplicada por el área urbana en el año inicial.

En la metodología se muestra que la intensidad absoluta es igual al valor observado en el año final menos el valor esperado en ese mismo año: $INAB = Urb_{i,t+n} - \widehat{Urb}_{i,t+n}$

Sustituyendo términos para el valor de $\widehat{Urb}_{i,t+n}$ en el punto 2:

$$INAB = Urb_{i,t+n} - \widehat{Urb}_{i,t+n} = Urb_{i,t+n} - \frac{Pop_{i,t+n} * Urb_{i,t}}{Pop_{i,t}}$$

Se llega a esta misma expresión si el punto de partida fuera $INAB_i = IEU_i * Urb_{i,t}$

$$INAB_i = IEU_i * Urb_{i,t} = \left(\frac{Urb_{i,t+n}}{Urb_{i,t}} - \frac{Pop_{i,t+n}}{Pop_{i,t}} \right) * Urb_{i,t}$$

Multiplicando y eliminado términos:

$$\begin{aligned} INAB_i &= IEU_i * Urb_{i,t} = \left(\frac{Urb_{i,t+n}}{Urb_{i,t}} - \frac{Pop_{i,t+n}}{Pop_{i,t}} \right) * Urb_{i,t} \\ &= \frac{Urb_{i,t+n}}{\cancel{Urb_{i,t}}} \cancel{Urb_{i,t}} - \frac{Pop_{i,t+n}}{Pop_{i,t}} Urb_{i,t} = Urb_{i,t+n} - \frac{Pop_{i,t+n}}{Pop_{i,t}} * Urb_{i,t} \end{aligned}$$

Por lo tanto, se demuestra que:

$$INAB_i = IEU_i * Urb_{i,t} = Urb_{i,t+n} - \widehat{Urb}_{i,t+n} = Urb_{i,t+n} - \frac{Pop_{i,t+n}}{Pop_{i,t}} * Urb_{i,t}$$

Nótese que el último término de la derecha es el numerador del Índice de Expansión Urbana (IEU) de la OECD. Por lo tanto, El IEU mide la INAB como proporción del área inicial. Despejando el IEU de la expresión $INAB_i = IEU_i * Urb_{i,t}$:

$$IEU_i = \frac{INAB_i}{Urb_{i,t}} \text{ Sustituyendo términos en la INAB, se obtiene el IEU de la OECD:}$$

$$IEU_i = INRE_i = \frac{Urb_{i,t+n} - \frac{Pop_{i,t+n}}{Pop_{i,t}} * Urb_{i,t}}{Urb_{i,t}}$$

El IEU, a su vez, puede ser reducido o sintetizado de la manera que se muestra en el punto 1. Como se describe en el texto, esta síntesis es en el interés de la parsimonia, en aras de mayor claridad expositiva y para remediar el problema de la sobrevaloración o subestimación de la expansión urbana en áreas pequeñas o áreas grandes, respectivamente.

Suplemento estadístico. Datos ordenados por la intensidad absoluta (INAB) para 135 ciudades.

Ciudades	Inten. Rel. (%)	Inten. Abs. (has)	Área (has)		Población (habitantes)	
			2000	2010	2000	2010
ZM Cancún	127.15	5,520	4,341	12,340	431,128	677,379
ZM Juárez	22.07	4,339	19,661	25,828	1,218,817	1,332,131
ZM Chihuahua	25.59	3,362	13,136	19,441	696,495	852,533
ZM V Mx	1.55	2,587	167081	185,291	18,396,677	20,116,842
ZM Acapulco	24.55	2,395	9,755	13,036	791,558	863,431
ZM Pachuca	22.33	1,768	7,918	12,582	375,022	512,196
ZM León	11.35	1,399	12,327	17,031	1,269,179	1,609,504
ZM Mexicali	9.94	1,334	13,424	17,782	764,602	936,826
ZM La Laguna	6.73	1,004	14,904	18,993	1,007,291	1,215,817
ZM Guada	2.20	875	39,795	48,585	3,699,136	4,434,878
ZM Celaya	13.67	758	5,547	7,484	496,541	602,045
San Miguel de Allende	71.67	743	1,037	1,956	59,691	69,811
Playa del Carmen	91.54	685	748	3,256	43,613	149,923
Chilpancingo	33.77	647	1,915	3,188	148,485	197,052
Acámbaro	61.04	491	805	1,332	55,516	57,972
Cozumel	41.34	455	1,101	1,891	59,225	77,236
Iguala	23.85	420	1,760	2,410	104,759	118,468
ZM Matamoros	5.79	408	7,055	8,662	418,141	489,193
ZM Oaxaca	3.77	406	10,748	13,441	501,283	607,963
Hidalgo del Parral	23.45	365	1,557	2,016	98,876	104,836
Puerto Peñasco	32.16	336	1,046	2,285	30,466	56,756
Huajuapán de León	40.94	317	774	1,270	43,073	53,043
ZM Zac-Gpe	9.74	277	2,846	3,908	242,720	309,660
La Paz	10.04	275	2,742	3,896	162,954	215,178
ZM Veracruz	4.18	266	6,355	7,765	687,820	811,671
ZM Tehuantepec	7.03	261	3,712	4,375	145,567	161,337
Guanajuato	18.21	258	1,414	1,921	93,513	110,011
ZM Tulancingo	4.57	231	5,050	6,479	193,638	239,579
ZM Moreleón-Urian	13.60	213	1,563	1,910	100,063	108,669
Tepatitlán de Mor	14.57	212	1,453	2,011	74,262	91,959
ZM Querétaro	2.27	209	9,231	12,612	816,481	1,097,025
ZM de Tezuitlán	9.30	191	2,053	2,639	102,727	122,500
ZM Poza Rica	3.52	189	5,379	6,101	467,258	513,518
Zihuatanejo	24.93	151	607	871	56,853	67,408
Atlixco	5.65	145	2,562	2,826	82,838	86,690
Cd Obregón	3.02	102	3,369	4,100	255,425	303,126
San Luis de la Paz	11.48	99	863	1,154	46,326	56,630
ZM Irapuato	2.44	98	4,001	4,917	326,973	393,862
Juchitán	9.11	97	1,066	1,331	64,642	74,825
Ciudad Hidalgo (Mich)	8.87	96	1,081	1,289	54,854	60,542
Taxco	10.60	93	877	1,000	50,488	52,217
Guasave	7.27	80	1,095	1,321	62,801	71,196
Caborca	5.12	79	1,542	1,930	49,917	59,922
Lagos de Moreno	4.76	73	1,542	1,976	79,592	98,206
Agua Prieta	5.27	70	1,325	1,764	60,420	77,254
Guamúchil	5.88	58	985	1,149	57,547	63,743
Valle de Santiago (Gto)	6.08	56	915	1,114	58,837	68,058

Ciudad Acuña	2.06	55	2,652	3,346	108,159	134,233
Chetumal	2.45	54	2,220	2,811	126,095	156,569
ZM de Guaymas	1.35	40	2,971	3,392	180,316	203,430
San José del Cabo	3.90	37	957	2,236	38,080	87,488
Nogales	1.51	37	2,443	3,347	156,854	212,533
Ciudad Mante	1.90	31	1,642	1,760	80,533	84,787
ZM de Tula	0.46	29	6,340	7,709	169,901	205,812
ZM de Ocotlán	1.37	29	2,083	2,384	125,027	141,375
Apatzingán	1.65	27	1,613	1,730	93,756	99,010
San Andrés Tuxtla	2.90	21	735	849	54,853	61,769
Campeche	0.54	21	3,882	4,673	190,813	228,670
Ciudad Guzmán	1.15	14	1,213	1,407	85,118	97,750
Matehuala	0.87	13	1,483	1,799	64,206	77,328
Fresnillo	0.20	4	1,796	2,238	101,151	125,846
Nuevo Casas Grandes	-0.03	-1	2,617	2,885	50,378	55,553
ZM de Acayucan	-0.25	-4	1,447	1,584	102,992	112,996
ZM Morelia	-0.24	-20	8,300	10,120	679,109	829,625
ZM La Piedad-Pén	-0.75	-23	3,063	3,309	229,372	249,512
Zacapu	-2.22	-29	1,307	1,377	49,086	52,806
Los Mochis	-1.21	-31	2,587	3,273	200,906	256,613
ZM Orizaba	-0.59	-38	6,506	7,246	381,730	427,406
Martínez de la Torre	-2.90	-40	1,393	1,623	65,505	78,219
Dolores Hidalgo	-5.07	-46	897	1,009	50,391	59,240
ZM Córdoba	-1.20	-46	3,801	4,298	276,553	316,032
Sahuayo de Morelos	-4.70	-56	1,190	1,270	57,827	64,431
Pátzcuaro	-6.56	-59	901	979	47,993	55,298
Cortazar (GTO)	-7.97	-63	790	841	53,886	61,658
Cárdenas (Tabasco)	-3.53	-67	1,904	2,149	81,944	95,379
Tianguistenco	-3.18	-69	2,161	2,610	127,413	157,944
ZM Villahermosa	-0.93	-71	7,697	9,610	600,580	755,425
ZM de Tecomán	-3.95	-93	2,344	2,500	127,863	141,421
Zitácuaro	-4.04	-93	2,309	2,465	81,700	90,520
Túxpam	-4.75	-98	2,068	2,299	93,531	108,418
ZM Mérida	-0.56	-105	18,757	22,598	803,920	973,046
ZM Minatitlán	-1.46	-112	7,631	8,292	323,389	356,137
Huachinango (pue)	-10.89	-115	1,052	1,146	49,452	59,256
ZM Colima-VA	-2.31	-124	5,355	6,369	275,677	334,240
Delicias	-6.34	-124	1,964	2,227	98,615	118,071
Arandas	-15.50	-126	816	952	39,478	52,175
Linares (NL)	-9.23	-132	1,430	1,549	53,681	63,104
Cuauhtémoc	-5.01	-159	3,171	4,075	85,387	114,007
Cabo San Lucas	-18.84	-159	844	2,086	48,143	128,057
ZM Xalapa	-2.64	-178	6,749	7,927	554,990	666,535
ZM Zamora-Jac	-5.79	-179	3,096	3,405	216,048	250,113
ZM Mazatlán	-4.70	-184	3,908	4,363	327,989	381,583
Cd L. Cárdenas	-3.43	-188	5,488	5,753	126,828	137,306
Navojoa	-8.99	-200	2,230	2,385	98,187	113,836
Tapachula	-6.16	-204	3,309	3,709	182,018	215,235
ZM Ags	-2.63	-204	7,768	9,750	727,582	932,369
Sn Luis Río Colora	-5.41	-205	3,791	4,527	126,645	158,089
Salamanca	-8.47	-212	2,499	2,710	137,000	160,169
Huamantla	-10.52	-219	2,081	2,435	46,195	58,912
ZM Uruapan	-6.88	-235	3,418	3,839	232,252	276,839

ZM Durango	-4.87	-252	5,189	6,049	427,135	518,709
Sabinas	-12.00	-258	2,150	2,223	47,578	54,905
Ciudad Valles	-10.78	-279	2,585	2,769	105,721	124,644
ZM Piedras Negras	-5.17	-282	5,463	6,250	151,149	180,734
ZM Coatzacoalcos	-4.97	-305	6,141	6,625	307,724	347,257
ZM Ríoverde-Cd Fdz	-8.13	-309	3,803	3,686	128,935	135,452
Ciudad del Carmen	-15.67	-343	2,191	2,603	126,024	169,466
ZMSn Fco del Rin	-17.68	-388	2,192	2,369	145,017	182,365
Ensenada	-7.47	-403	5,389	6,323	231,241	288,597
Comitán	-17.22	-409	2,377	2,888	70,311	97,537
ZM Monclova	-5.22	-424	8,124	8,690	282,853	317,313
San Juan del Río	-20.19	-519	2,571	3,070	99,483	138,878
Sn Juan Bautista Tuxtepec	-14.52	-527	3,628	3,856	87,071	105,182
Cd Victoria	-13.16	-535	4,063	4,444	249,029	305,155
ZM Hermosillo	-6.42	-575	8,960	11,161	545,928	715,061
Manzanillo	-17.49	-577	3,296	3,836	104,791	140,290
Acatzingo de Hidalgo	-21.22	-578	2,725	2,860	47,197	59,552
ZM Culiacán	-8.18	-582	7,118	8,312	540,823	675,773
ZM Cuautla	-7.04	-584	8,294	9,089	372,256	434,147
ZM Reynosa-RB	-6.24	-660	10,579	14,001	524,692	727,150
ZM SLP	-6.70	-862	12,859	14,863	850,828	1,040,443
ZM Nvo Laredo	-10.07	-891	8,851	10,041	310,915	384,033
ZM Tepic	-20.38	-898	4,406	4,620	342,840	429,351
San Cristóbal	-35.86	-1,065	2,971	3,110	112,442	158,027
ZM Tampico	-7.59	-1,092	14,385	15,471	746,417	859,419
ZM de Tehuacán	-18.09	-1,111	6,140	6,469	240,507	296,899
ZM Cuernavaca	-9.74	-1,603	16,454	17,450	798,782	924,964
ZM Pto Vallarta	-32.23	-1,634	5,070	6,242	244,536	379,886
ZM Tijuana	-10.36	-2,319	22,380	26,672	1,352,035	1,751,430
ZM Toluca	-8.04	-2,407	29,928	35,208	1,540,452	1,936,126
ZM Tuxtla	-20.93	-2,697	12,887	14,145	523,482	684,156
ZM Mty	-6.94	-3,819	55,035	63,018	3,381,005	4,106,054
ZM Tla-Apizaco	-17.42	-4,089	23,478	24,630	408,401	499,567
ZM Saltillo	-23.63	-4,293	18,171	19,177	637,273	823,128
ZM Pue-Tla	-11.94	-6,761	56,619	61,301	2,269,995	2,728,790

Fuente: Estimaciones propias y SEDESOL (2012).

Referencias Bibliográficas

- ALVAREZ DE LA TORRE, G. Estructura y temporalidad urbana de las ciudades intermedias en México. *Frontera Norte*, 2000, 23(46).
- ANDERSON, P. *Business Economics and Finance with MATLAB®, GIS, and Simulation Models*. Boca Ratón, Florida: Chapman y Hall/CRC Press LLC, 2005.
- ANGEL, S. *Planet of cities*. USA: The Lincoln Institute of Land Policy, 2012.
- BENTO, A., CROPPER, M., MUSHFIQ MOBARAK, A., y VINHA, K. The effects of urban spatial structure on travel demand in the United States. *The Review of Economics and Statistics*, 2005, 87(3), 466–478.
- BREZZI, M., y VENERI, P. Assessing Polycentric Urban Systems in the OECD: Country, Regional and Metropolitan Perspectives. *OECD Regional Development Working Papers*, 2014, No. 2014/01.
- CONSEJO NACIONAL DE POBLACIÓN. CONAPO. Potencial de desarrollo de las ciudades de México. . 2014. [En línea] 2014. [Citado el: 1 de 12 de 2016.]

- http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Potencial_de_desarrollo_de_las_ciudades_de_Mexico
- ECHEVERRI-CARROLL, E., y AYALA, S. Gender wage differentials and the spatial concentration of high-technology industries. En: PÁEZ, A., GALLO, J., BULIUNG, R.N., DALL'ERBA, S. *Progress in Spatial Analysis*, Berlin Heidelberg: Springer, 2010, p. 287–309.
- ERSOY, A. Geographical Embeddedness of Large Corporations in Turkey. En: MICEK, G. *Understanding Innovation in Emerging Economic Spaces*. New York: Routledge, 2016, pp. 73-96.
- EWING, R. y HAMIDI, S. Measuring Urban Sprawl and Validating Sprawl Measures. . [En línea] [Citado el: 1 de 12 de 2016.] website: <https://gis.cancer.gov/tools/urban-sprawl/>.
- FINGLETON, B., IGLIORI, D., y MOORE, B. Employment growth of small computing services firms and the role of horizontal clusters: evidence from computing services and R&D in Great Britain, 1991–2000. *Urban Studies*, 2004, 41(4), 773–799.
- FINGLETON, B., IGLIORI, D., MOORE, B., y ODEDRA, R. Employment growth and clusters dynamics of creative industries in Great Britain. En: POLENSKE, K. *The Economic Geography of Innovation*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007, pp. 60-84.
- FINGLETON, B., IGLIORI, D., y Moore, B. Employment Growth in ICT Clusters: New Evidence from Great Britain. En: KARLSSON, C., *Handbook of Research on Innovation and Clusters. Cases and Policies*, Cheltenham, UK y Northampton, MA, USA: Edward Elgar Publishing, 2008.
- FUENTES, C., y HERNÁNDEZ, V. La evolución espacial de los subcentros de empleo en Ciudad Juárez, Chihuahua (1994-2004): un análisis con indicadores de autocorrelación espacial global y local. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 2015, 30(2), 433-467.
- GALSTER, G., HANSON, R., WOLMAN, H., RATCLIFFE, M., COLEMAN, S., y FREIHAGE, J. Wrestling sprawl to the ground: Defining and measuring an elusive concept. *Housing Policy Debate*, 2001, 12(4), 681–685.
- GARZA VILLARREAL, G. *La urbanización de México en el siglo XX*. México: El Colegio de México, 2003.
- HAJRASOULIHA, A. H., y HAMIDI, S. The typology of the American metropolis: monocentricity, polycentricity, or generalized dispersion? *Urban Geography*, 2016, 1-25.
- HAMIDI, S., EWING, R., DODDS, A., y PREUS, I. Measuring Sprawl and Its Impacts: An Update. *Journal of Planning Education and Research*, 2015, 35(1), 35–50.
- HOLCOMBE, R., y WILLIAMS, D. Urban sprawl and transportation externalities. *The Review of Regional Studies*, 2012, 40(3), 257–272.
- HUANG, J., LU, X., y SELLERS, J. M. A global comparative analysis of urban form: Applying spatial metrics and remote sensing. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 82(4), 184-197. doi:10.1016/j.landurbplan.2007.02.010
- INSTITUTO MEXICANO PARA LA COMPETITIVIDAD A. C. IMCO. *Competitividad Urbana 2014 ¿Quién manda aquí? La gobernanza de las ciudades y el territorio en México*. México: IMCO, 2014.
- KAHN, M. *Green cities: Urban growth and the environment*. Washington, DC: Brookings Institution Press, 2006.
- KASANKO, M., BARREDO, J. I., LAVALLE, C., MCCORMICK, N., DEMICHELI, L., Sagris, V., y Brezger, A. Are European cities becoming dispersed? *Landscape and Urban Planning*, 2006, 77(1-2), 111-130. doi:10.1016/j.landurbplan.2005.02.003

- LÓPEZ, R., y HYNES, H. Sprawl in the 1990s: Measurement, distribution, and trends. *Urban Affairs Review*, 2003, 38(3), 325–355.
- OECD *Urban Policy Reviews: Mexico 2015: Transforming Urban Policy and Housing Finance*. Paris: OECD Publishing, 2015
- PERES DA SILVA, G., y DAVIDIAN, A. Identification of Areas of Vote Concentration: Evidences from Brazil. *Brazilian political science review*, 2013, 7(2), 141-155.
- RATANAWARAH, A., y POLENSKE, K. Measuring geography of innovation: a literature review. En: POLENSKE, K. *The Economic Geography of Innovation*. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2007.
- REIS, J., SILVA, E., y PINHO, P. Measuring Space. A review of spatial metrics for urban growth and shrinkage. En: SILVA, E., HEALEY, P., HARRIS, N., VAN DEN BROECK, P. *The Routledge Handbook of Planning Research Methods*. New York: Routledge, 2015.
- RIVERA, L., SHEFFI, Y., y WELSCH, R. Logistics agglomeration in the US. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2014, 59, 222-238.
- RUSSILDI, R. 2016. Duplican población, área urbana crece 10 veces. *Periódico el Norte*. Junio 24, 2016.
- SCHNEIDER, A., y WOODCOCK, C.E. Compact, Dispersed, Fragmented, Extensive? A Comparison of Urban Growth in Twenty-five Global Cities using Remotely Sensed Data, Pattern Metrics and Census Information. *Urban Studies*, 2008, 45(3), 659-692. doi:10.1177/0042098007087340
- SCHWARZ, N. Urban form revisited—Selecting indicators for characterising European cities. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 96(1), 29-47. doi:10.1016/j.landurbplan.2010.01.007
- SCOTT, I. *Urban and Spatial Development in Mexico*. Baltimore and London: World Bank-The Johns Hopkins University Press, 1982.
- SECRETARÍA DE DESARROLLO SOCIAL SEDESOL. *La expansión de las ciudades 1980-2010* (2nd ed.). México: SEDESOL, 2012.
- SEVTSUK, A., y AMINDARBARI, R. 2012. Measuring growth and change in east-asian cities. [En línea] 2012. [Citado el: 1 de Abril de 2016.] <http://cityform.mit.edu/projects/measuring-urban-expansion>.
- SONG, Y., y KNAAP, G. Measuring Urban Form. Is Portland Winning the War on Sprawl? *Journal of the American Planning Association*, 2004, 70(2).
- SUÁREZ, M., y DELGADO, J. La expansión urbana probable de la Ciudad de México. Un escenario pesimista y dos alternativos para el año 2020. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 2007, 22(1), 101-142.
- TUOK, I., y MYKHENKO, V. The trajectories of European cities, 1960–2005. *Cities*, 2007, 24(3), 165-182. doi:10.1016/j.cities.2007.01.007
- UNIKEL, L., RUIZ CHIAPETTO, C., y GARZA, G. *El Desarrollo Urbano de México* (2nd ed.). México: El Colegio de México, 1978.
- YANG, J., HOLT, J., ZHANG, X., y FRENCH, S. Measuring the Structure of U.S. Metropolitan Areas, 1970–2000. *Journal of the American Planning Association*, 2012, 78(2), 197-209.