

LA EXPANSIÓN DE LA CIUDAD DE MÉXICO AL 2040:

DETERMINACIÓN DE NUEVAS ÁREAS DE URBANIZACIÓN A TRAVÉS DE MODELOS DE SIMULACIÓN URBANA

*Roberto Ramírez Hernández*¹

*Normand Eduardo Asuad Sanén*²

RESUMEN

El desarrollo urbano de la Ciudad de México hacia el año 2040 requiere ser atendido desde una perspectiva integral del desarrollo urbano con un enfoque analítico espacial y de prospectiva que permita en el largo plazo dimensionar los esfuerzos y la orientación de la política pública para la provisión de servicios y en concreto del tipo de planeación urbana.

El reto es aún mayor si consideramos que la política pública actual es parcial, con énfasis en lo sectorial, orientada a atacar problemas individuales del desarrollo urbano ya sea el abasto de agua, el transporte y la vivienda sin considerar las tendencias y forma urbana que tiende la ciudad a largo plazo.

El modelo propuesto, basado en técnicas de simulación espacial mediante Autómatas Celulares, pretende ser una herramienta de análisis para las tendencias del desarrollo urbano de la Ciudad de México, esto es, se pretende determinar las nuevas áreas urbanizadas en la ciudad hacia el año 2040. Cabe decir que los resultados del modelo establecerán las

¹ Maestro en Economía, Investigador de Tiempo Completo en el Instituto de Investigaciones Económicas de la UNAM, tel. (55) 5623-0100 ext. 42358, Email: robrami@unam.mx

² Doctor en Economía, Profesor de Carrera de T.C. en la Facultad de Economía de la UNAM, tel. (55) 5622-1888 ext. 48926, Email: nasuad@yahoo.com

tendencias de crecimiento urbano para la Ciudad de México hacia 2040 o hacia cualquier otro horizonte deseado.

La técnica de Autómatas Celulares para un ejercicio de simulación urbana, consiste en la evaluación de un sistema de celdas en las que ha sido dividida el área de estudio, es decir la Ciudad de México. Cada celda contiene información sobre las características físico-territoriales específicas, datos sobre población y empleo, acceso a redes viales, zonas restringidas a la urbanización, entre otras, con las que se estimará una probabilidad de urbanización. Cada evaluación representará un año y con ello es posible 'detener' la simulación en el 2040 o cualquier otro periodo, para de esta manera observar las tendencias de expansión de la ciudad. Cabe decir que la evaluación de cada celda territorial se realiza mediante técnicas de regresión logística binomial, misma que permite obtener valores probabilísticos para cada caso.

1. BREVE PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

A pesar de que la Ciudad de México ha experimentado cambios económicos significativos en los últimos años y que al mismo tiempo se ha observado en términos generales una marcada desaceleración poblacional, misma que ha tenido impactos en la ocupación territorial, no se ha hecho de manera clara la asociación de estos fenómenos por parte de investigadores y estudiosos de la ciudad. Mucho menos se han relacionado con los cambios económicos de carácter estructural suscitados en el país a partir de los años ochenta.

En los estudios existentes sobre la Ciudad de México se observa la falta de un enfoque económico que espacial y territorialmente explique la expansión urbana así como el crecimiento económico y poblacional de la ciudad, la mayor parte de los estudios se realizan con un enfoque demográfico o físico-espacial sin considerar el impacto que tiene la actividad

económica en la estructura y en la forma física de la ciudad el comportamiento de la economía de la ciudad, más aún, es notable el patrón policéntrico de la ciudad constituido por diversos subcentros de actividad económica al interior de la ciudad y su asociación con el empleo, la población y su respectiva localización.

A pesar de ello y de su naturaleza fundamentalmente económica, no se ha realizado un estudio que de manera rigurosa, a partir de un enfoque económico que incluya la Dimensión Espacial de la Economía, la caracterice y muestre de modo formal su naturaleza económica y las implicaciones que tiene para el desarrollo urbano por su vinculación entre actividad económica, su localización y los usos de suelo a que da lugar.

Por otra parte, la política territorial y la planeación urbana para el caso de la Ciudad de México se han caracterizado por ser reactivas y por carecer como en el caso de los estudios, de un análisis económico riguroso sobre las repercusiones del comportamiento económico sobre la estructura urbana y su funcionamiento.

De ahí la necesidad de investigar y demostrar el carácter económico del desarrollo urbano en la Ciudad de México mostrando el origen de su estructura económico-territorial y sus impactos en la expansión urbana de la ciudad. Asimismo se advierte la necesidad de ofrecer instrumentos precisos y flexibles que coadyuven en los procesos de planeación y desarrollo urbano de la ciudad.

Objetivos:

El presente trabajo pretende entonces, alcanzar los siguientes objetivos generales:

- 1) Plantear los factores que explican la expansión territorial para el caso de la Ciudad de México.

- 2) Establecer las tendencias de la ocupación territorial que se enfrentarán, al interior de la Ciudad de México hacia el año 2040 a través de un modelo de simulación urbana.

2. CONCLUSIONES PRELIMINARES

- 1) El crecimiento urbano para el año 2040 requiere de políticas públicas integrales basadas en el comportamiento integral del desarrollo urbano, sin las cuales no será posible atender satisfactoriamente los retos del desarrollo de la ciudad.
- 2) Las políticas de desarrollo urbano deben ser integrales y espacialmente diferenciadas teniendo como eje la planeación urbana agregada y su coordinación con la planeación municipal y local.
- 3) El modelo de simulación señaló las áreas con mayor probabilidad de urbanización para la Ciudad de México al 2040, lo que permitió el dimensionamiento de los retos de desarrollo urbano así como la identificación de las propuestas concretas.

3. PALABRAS O CONCEPTOS CLAVE QUE AYUDEN A IDENTIFICAR TEMÁTICAMENTE EL TRABAJO (3)

Autómatas Celulares, simulación urbana, desarrollo urbano, crecimiento económico urbano, estructura policéntrica.

1. EVIDENCIA EMPÍRICA Y PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.

El término “Ciudad de México” ha sido utilizado por la mayoría de estudiosos e interesados en su evolución, de maneras diferentes. De hecho desde un punto meramente formal y normativo, “Ciudad de México” ó “ciudad de México” han significado diferentes cosas a lo largo del tiempo y de allí las confusiones que se han dado en su estudio y caracterización³.

Para efectos de este trabajo, se entiende por Ciudad de México una unidad económico-funcional⁴ en la que la suma de las diferentes localidades urbanas, municipios y delegaciones, dan a la ciudad un estatus de ente económico integrado. En términos de información y análisis, se tomarán los datos de la llamada Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) dada su facilidad de manejo, relativa disponibilidad de datos y a su proximidad conceptual al término “unidad económico-funcional”. En este sentido, términos como “Distrito Federal” no tienen un sentido analítico certero como tampoco el concepto Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM).

³ La Ciudad de México (ó ciudad de México) se ha denominado como tal a partir de la obtención de su época independiente y al inicio del Distrito Federal en 1824 (antes era simplemente la capital de la Nueva España). En ese entonces se entendía por "ciudad de México" el área urbana de la capital del país, la cual quedó dentro del recién formado Distrito Federal en el mismo 1824. En muchos años a esta área urbana se le conoció como "México" o como "Ciudad de México", sin embargo coexistió con diversas divisiones políticas, en las que han existido municipalidades, prefecturas, distritos y finalmente delegaciones. Al inicio del siglo XX la Ciudad de México fue dividida en 12 áreas llamadas "cuarteles", de allí que desde entonces el Distrito Federal contó con 12 delegaciones y la Ciudad de México (dividida a su vez en 12 cuarteles). A partir de 1970 desapareció la Ciudad de México como parte de la división política del D.F. (al igual que sus cuarteles) y fue dividida en otras cuatro delegaciones: Cuauhtémoc, Benito Juárez, Miguel Hidalgo y Venustiano Carranza. Por ello a partir de 1970, el término "Ciudad de México" desapareció como término legal en referencia a un territorio, pero al mismo tiempo se le comenzó a llamar Ciudad de México a la capital del país, sin hacer distingo si se refería al territorio legal del Distrito Federal o incluyendo a toda su zona conurbada del Estado de México. Con los años el discurso político de los Jefes del Departamento del Distrito Federal (DDF) y de los actuales Jefes de Gobierno del Distrito Federal (GDF) se ha apropiado del término "Ciudad de México" para referirse al territorio del Distrito Federal hasta ser generalmente aceptado, pero no necesariamente legal, causando confusión en la definición exacta de lo que es en realidad la Ciudad de México.

⁴ Una unidad económico-funcional se forma a partir de una o más manifestaciones de concentración económica en el espacio, esto es, en un territorio donde se localiza(n) dicha(s) concentración(es). Estos fenómenos de concentración guardan una estrecha relación de complementariedad económica, de tal manera que sus interacciones espaciales, es decir, sus flujos económicos, son significativamente más importantes que a otras zonas o territorios. De este modo la unidad económico-funcional desempeña una serie de papeles económicos y da lugar a todo un sistema económico que se asocia con las características físicas del territorio. La unidad económico-funcional no considera los límites político-administrativos que pudiera haber. De esta manera una entidad federativa o un municipio en el caso de México no refleja fielmente la actividad económica en las áreas contiguas y por ello no puede verse como unidad económico-funcional.

De allí que para efectos del presente trabajo, se entenderá por Ciudad de México toda actividad económica y poblacional registrada en todas las localidades urbanas contenidas en las 75 unidades político-administrativas que actualmente componen la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM)⁵.

EVIDENCIA TEÓRICA.

La importancia de las ciudades ha dado lugar a una gran variedad de enfoques teóricos que pretenden explicar los principios básicos del crecimiento urbano. Estos enfoques tienen orígenes diversos, abordando desde perspectivas sociales, históricas, económicas y demográficas sin soslayar vertientes probablemente más recientes como las del Urbanismo, la Arquitectura o la Geografía.

De allí que resulte compleja la tarea de clasificar todas ellas. Al hablar de su crecimiento se hace generalmente en relación al incremento de su población total de un periodo a otro, asimismo se hace referencia a su expansión física, la cual se concibe como la incorporación de espacios o territorios a una ciudad, de modo que su crecimiento poblacional está fuertemente asociado, por regla general, con el territorial. Naciones Unidas (1952) por ejemplo, ha aceptado la complejidad de abordar lo urbano al afirmar que no existe una frontera claramente definida entre lo que es urbano y lo que es rural⁶. Autores de la talla de Émile Durkheim, Sorokin y Zimmerman (1928) o Pierre George (1982) han realizado propuestas para definir a la ciudad desde criterios más objetivos, siempre con limitaciones.

⁵ La definición actual de Zona Metropolitana de la Ciudad de México fue dada en consenso por las tres instancias responsables de medir y analizar los procesos en las ciudades mexicanas: La Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y el Consejo Nacional de Población (CONAPO). La definición vigente fue actualizada en 2005 y consiste en las mismas 58 unidades político-administrativas (cotejar), en este caso municipios del Estado de México, el municipio Tizayuca del estado de Hidalgo y las 16 delegaciones políticas del Distrito Federal.

⁶ En el Anuario Demográfico de las Naciones Unidas (1952) se concluye lo siguiente: "... no existe un punto en el continuo que va desde la gran aglomeración a los pequeños agrupamientos o viviendas aisladas en donde desaparezca lo urbano y comience lo rural; la división entre la población urbana y rural es necesariamente arbitraria".

Los enfoques teóricos de crecimiento urbano en esta vertiente pretenden señalar la importancia de los patrones tanto económicos como residenciales que se dan al interior de los espacios urbanos. Pretenden asimismo establecer una relación entre estos patrones y la estructura económica así como la forma urbana, tales patrones se expresan en el territorio mediante los usos de suelo urbano resultantes de dicha actividad.

Son múltiples los autores que han realizado propuestas para caracterizar tales patrones de localización al interior de las ciudades. Las propuestas ofrecen una gran diversidad de explicaciones sobre las causas del crecimiento urbano y los patrones mencionados. En este sentido resaltan los trabajos de von Thünen (1826), Marshall (1890), Christaller, Weber, Lösch y Alonso (1964) que destacan la importancia de la actividad económica como factor de crecimiento, asimismo estos autores señalaron el papel de la localización económica en la estructuración de los usos de suelo. Por otro lado, Burgess (1925), Hoyt (1939), Harris & Ullman (1945), Alonso (1964), Muth (1969) y Thrall (1987) enfocan el crecimiento urbano y su relación con los usos de suelo urbano generados. Otros autores como Bradford & Kelejian (1973), Clark & Onaka (1983), Kendig (1984), Margo (1992), Haurin & Brasington (1996), South & Crowder (1997), Bogart & Cromwell (2000) y Clark, Deurloo & Dielman (2000) destacan los cambios demográficos y el estilo de vida como factor determinante en el crecimiento urbano.

Asimismo factores como las preferencias por la vivienda han sido asociados con el crecimiento de las ciudades por Devaney (1991) y Megbolugbe & Simmons (1995), las redes de transporte por (Cervero y Landis (1995) y Garreau (1991), los niveles cambiantes de ingresos por Mieszkowski y Mills (1993), la incidencia de la delincuencia por Berry-Cullen y Levitt (1999), la segregación racial por Alba y Logan (1991), la aplicación de planes urbanos por DeGrove (1993) así como el surgimiento y cambios en los servicios urbanos por Tiebout (1956), Bayoh, Irwin, y Haab (2002).

Crecimiento Urbano Perspectiva Intraurbana	
Autor	Argumentos Centrales
von Thünen (1826). Marshall (1890). Burgess (1925). Hoyt (1939). Harris & Ullman (1945). Alonso (1964). Muth (1969) y Thrall (1987)	El crecimiento urbano tiene una relación directa con los usos de suelo existentes, demostrando que existe un patrón de localización cognoscible y específico.
Bradford & Kelejian (1973). Clark & Onaka (1983). Kendig (1984). Margo (1992). Haurin & Brasington (1996). South & Crowder (1997). Bogart & Cromwell (2000) y Clark, Deurloo & Dielman (2000)	El crecimiento urbano y los patrones de usos de suelo están determinados por el estilo de vida de los habitantes, mismos que generan determinados patrones demográficos al interior de las ciudades.
Devaney (1991) y Megbolugbe & Simmons (1995)	Preferencias específicas en la adquisición de vivienda.
Cervero y Landis (1995) y Garreau (1991)	Las redes de transporte afectan los patrones de urbanización
Mieszkowski y Mills (1993)	Cambios en los niveles de ingreso familiar afectan los patrones de urbanización.
Berry-Cullen y Levitt (1999)	Los niveles de la delincuencia afectan los patrones de urbanización.
Alba y Logan (1991)	Los conflictos por segregación racial afectan los patrones de urbanización.
DeGrove (1993)	Las decisiones oficiales y la intervención por planes urbanos afectan los patrones de urbanización.
Tiebout (1956). Bayoh. Irwin. y Haab (2002)	Las comodidades derivadas de cambios en el nivel de servicio o por surgimiento de nuevos servicios urbanos afectan los patrones de urbanización.

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.

De acuerdo a lo anterior, es claro que se requiere de un modelo que analice las tendencias del desarrollo urbano policéntrico de Ciudad de México y de las políticas urbanas, así como los principales factores económicos, sociales y espaciales que lo determinan. El modelo como el planteado permitiría el análisis de escenarios de política. Asimismo facilitaría la comprensión de los factores responsables de la forma urbana y por tanto de necesidades futuras en materia de infraestructura y servicios urbanos como agua potable, vivienda, transporte público, etc.

De allí que se plantee la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuáles son las tendencias del crecimiento urbano así como de las políticas y planes de ordenamiento frente a los retos futuros que para el año 2040 enfrentará la Ciudad de México?

2. ELEMENTOS DEL MARCO TEÓRICO Y PROPUESTA DE INTERPRETACIÓN.

Dado que no se cuenta con una teoría unificada sobre el crecimiento económico urbano y la expansión urbana, se plantean los principales rasgos arquetípicos de la actividad económica en el espacio así como de la actividad residencial en el mismo, estos rasgos resumen los principios básicos planteados por diversos autores en temas igualmente variados en materia de crecimiento económico urbano y expansión de una ciudad. El objetivo es generar una propuesta teórica-metodológica que integre en la medida de lo posible los elementos estudiados y propuestos en la teoría disponible:

- 1) La actividad económica en el espacio se distribuye de manera concentrada en unos cuantos sitios e integrada en su entorno inmediato, caracterizado genéricamente por el modelo de Centro-Periferia.
- 2) La concentración de la actividad económica en el espacio (CEE) de estos sitios, se debe a que existen ventajas físicas naturales y artificiales desde las cuales se articula y organiza la actividad económica de la periferia.
- 3) El crecimiento económico en el espacio, se da a partir de la forma de la distribución de la actividad económica de Centro-Periferia, en la que de acuerdo a la dinámica económica entre estos elementos, operan fuerzas centrífugas y centrípetas que consisten en ...
- 4) Las fuerzas centrípetas son resultado de las externalidades espaciales de los sitios que concentran la actividad económica, dados de acuerdo a composición productiva y tamaño económico y poblacional.
- 5) Las fuerzas centrífugas operan como resultado de deseconomías de tamaño y/o cambios de actividad económica que encuentran ventajas locacionales en otros sitios.
- 6) La concentración económica y sus tendencias en el espacio dependen de tres factores principales:
 - a) Requerimientos de espacio de acuerdo al tipo de actividad económica
 - b) Intensidad en el uso de suelo
 - c) Mercados de destino
- 7) La concentración económica espacial (CEE) como resultado de los procesos anteriores forma el espacio económico, que al interactuar con el espacio natural y/o constituido forma o renueva el territorio económico definiendo las funciones económicas que esos espacios territorialmente se expresan mediante los usos de suelo y las formas en que se distribuye la actividad económica en el espacio que de manera genérica se considera teóricamente en tres tipos de unidades espaciales económico-funcionales:
 - a) Área Económico Espacial Funcional (AEEF)
 - b) Zona Económica Espacial Funcional (ZEEF)
 - c) Región Económica Espacial Funcional (REEF)

En resumen, la propuesta de interpretación plantea que, el crecimiento económico de una ciudad es resultado de las economías de aglomeración generadas así como de la presencia de rendimientos crecientes y presentes en un espacio urbano. Tales condiciones propician

concentración económica y/o dispersión económica, de manera que estas fuerzas de concentración y dispersión económicas dan lugar a la conformación de un sistema jerárquico de lugares centrales o subcentros que mantienen la mayoría de la actividad económica en la ciudad. De este modo tales sitios propician el surgimiento de mercados cuyas áreas de influencia atienden a la población residente dentro de tales áreas. En la medida que se mantengan las condiciones de rendimientos crecientes continuará el proceso de expansión de la ciudad, una vez que ya no existan condiciones de rendimientos crecientes la expansión de la ciudad se detendrá.



3. PROPOSICIÓN Y FORMALIZACIÓN DE UN MODELO PARA EL CRECIMIENTO ECONÓMICO URBANO POLICÉNTRICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

La estructura policéntrica de la Ciudad de México, ha impactado en los cambios en el área urbana, así como en cambios al uso de suelo a lo largo del tiempo. Los subcentros, como se ha planteado con anterioridad, surgen, declinan y/o permanecen teniendo impacto directo en los tipos de actividad económica de cada área de la ciudad, lo que a su vez tiene también influencia en los patrones residenciales de la población urbana, de allí que sea necesario reflejar la

influencia de la estructura policéntrica y su evolución en las nuevas áreas de urbanización, esto es, en los patrones futuros de urbanización de la ciudad.

El modelo propuesto está basado en la determinación de las nuevas áreas urbanizadas (NAU) para la Ciudad de México, en el que será posible observar sus principales patrones de localización en el espacio. El modelo pretende entonces mostrar de manera probabilística el surgimiento de las NAU con base en una serie de atributos del territorio natural y otros propios del espacio económico generado.

Para comprender lo anterior, debe afirmarse que las características físico-territoriales condicionan, anulan o favorecen los procesos de urbanización y de crecimiento económico, esto es que, dependiendo de las condiciones específicas del territorio potencialmente urbanizable se darán los procesos de crecimiento y expansión urbana. De allí que sea necesario que se reflejen barreras naturales como superficies montañosas, ríos y otros cuerpos de agua, las inclinaciones del territorio dado que algunas son mucho más favorables que otras. Debe asimismo contemplarse las características del suelo (tipo de suelo) por los mismos motivos, por otro lado, existen áreas que tienen una prohibición expresa de ser utilizadas para procesos de urbanización dadas sus características específicas: áreas naturalmente protegidas, parques públicos, zonas de recarga, áreas federales, etc. donde no es posible legalmente tener asentamientos humanos. Finalmente deberá reflejar los procesos de urbanización al tomar en cuenta la infraestructura urbana como las redes de transporte.

Para expresar todo lo anterior se aplicará la técnica denominada Autómatas Celulares (CA por sus siglas en inglés), misma que evalúa las condiciones de una malla, esto es, un conjunto de celdas cuadradas iguales y en función de su proximidad espacial determinar la influencia de las variables en cada celda. De allí que se deberá conformar esta serie de celdas que reflejen las

condiciones anteriores de modo que en función de cada celda específica y la influencia espacial que ésta tenga sobre sus vecinas, deberán predecirse las NAU. Las celdas abarcarán toda el área de estudio, es decir el territorio de la Ciudad de México así como territorio adyacente donde pudieran darse nuevos procesos de urbanización.

El modelo para predicción de las NAU con base en CA reflejará las condiciones de un periodo específico, sin embargo para conocer las condiciones reestimadas para el siguiente periodo, se evaluarán de manera iterativa las condiciones de cada celda en toda el área de estudio. Cada ciclo entonces representa la simulación de un año y se podrá realizar las predicciones mencionadas en el horizonte que se desee, que en el presente caso se ha fijado en 2040.

De esta manera, para representar matemáticamente el proceso de estimación de las celdas territoriales mencionadas mediante Autómatas Celulares (CA) y su evaluación en cada periodo en el futuro tenemos lo siguiente:

Sea $CT_{m \times n}$ un arreglo rectangular de $m \times n$ al que se llamará "celda territorial"
Sean también $CF_{m \times n}, IE_{m \times n}, RT_{m \times n}, SR_{m \times n}, DCBD_{m \times n}, DSUB_{m \times n}, DPT_{m \times n}, DVH_{m \times n},$
 $DEI_{m \times n}, DEC_{m \times n}, DES_{m \times n}$ arreglos de $m \times n$ tales que representan las características físicas, económicas, demográficas y de infraestructura asociadas a la celda territorial ct_{ij} de manera que cada elemento $cf_{ij}, ie_{ij}, rt_{ij}, \dots, des_{ij}$ expresa dichas características en su correspondiente ct_{ij} con $i = 1, \dots, m$ $j = 1, \dots, n$

Sea $S_{ct_{ij}}^t$ el estado de la celda ct_{ij} en la posición i, j en el periodo t .

De esta manera, $S_{ct_{ij}}^t$ constituye un elemento del conjunto finito de estados posibles para ct_{ij} . Sea ahora $S_{ct_{ij}}^{t+1}$ el estado de ct_{ij} en el periodo $t+1$.

Tenemos entonces que:

$$S_{ct_{ij}}^{t+1} = f(S_{ct_{ij}}^t, S_{\Omega_{ij}}^t)$$

Donde Ω_{ij} es el conjunto de celdas 'vecinas' a ct_{ij} o bien, a la relación de vecindad predefinida para ct_{ij} . Asumamos que Ω_{ij} se define por la vecindad de Moore, de allí que $\Omega_{ij} = \{ct_{i+1,j}, ct_{i-1,j}, ct_{ij+1}, ct_{ij-1}, ct_{i-1,j-1}, ct_{i-1,j+1}, ct_{i+1,j-1}, ct_{i+1,j+1}\}$. Por lo tanto $S_{\Omega_{ij}}^t$ es el conjunto de estados de las celdas Ω_{ij} en el periodo t y del mismo modo f es la función que define el conjunto de reglas de transición.

Si tomamos en cuenta que la celda ct_{ij} puede considerarse a sí misma como un miembro más de la vecindad predefinida (en este caso de la vecindad de Moore), entonces Ω_{ij} se define: $\Omega_{ij} = \{ct_{ij}, ct_{i+1,j}, ct_{i-1,j}, ct_{ij+1}, ct_{ij-1}, ct_{i-1,j-1}, ct_{i-1,j+1}, ct_{i+1,j-1}, ct_{i+1,j+1}\}$, por lo tanto la expresión anterior puede definirse como sigue:

$$S_{ct_{ij}}^{t+1} = f(S_{\Omega_{ij}}^t)$$

Para la estimación de las NAU en la Ciudad de México en 2040 a través de CA, se propone este modelo:

Sea ct_{ij} , donde $i = 1, \dots, m$ $j = 1, \dots, n$ la unidad territorial de referencia. Sea CT una matriz de $m \times n$ elementos, tal que $ct_{ij} \in CT$. La celda territorial se define como la unidad que contiene las densidades poblacionales dpt_{ij} , de viviendas habitadas dvh_{ij} , de empleo industrial dei_{ij} , de empleo en comercio dec_{ij} y de empleo en servicios des_{ij} .

Sea $t = 1, \dots, S$ los periodos históricos para cada matriz CT , de este modo se tienen una matriz CT tal que sus elementos ct_{ijt} consisten en la unidad territorial en el renglón i , la columna j y el periodo t .

De allí que a cada ct_{ijt} le corresponderá un valor de densidad de población dpt_{ijt} , de densidad de vivienda dvh_{ijt} , de empleo industrial dei_{ijt} , de empleo en comercio dec_{ijt} y de empleo en servicios des_{ijt} , respectivamente.

Sea US esto es (us_{ijt}) , el arreglo de $m \times n \times S$ con los usos de suelo de ct_{ijt} , es decir que:

$$us_{ijt} = \begin{cases} 0 & \text{si el territorio en } ct_{ijt} \text{ no está urbanizado} \\ 1 & \text{si el territorio en } ct_{ijt} \text{ es de industria} \\ 2 & \text{si el territorio en } ct_{ijt} \text{ es de comercio} \\ 3 & \text{si el territorio en } ct_{ijt} \text{ es de servicios} \\ 4 & \text{si el territorio en } ct_{ijt} \text{ es únicamente para vivienda con una densidad } \leq \omega \\ 5 & \text{si el territorio en } ct_{ijt} \text{ es únicamente para vivienda con } \omega < \text{densidad} \leq \xi \\ 6 & \text{si el territorio en } ct_{ijt} \text{ es únicamente para vivienda con una densidad } > \xi \end{cases}$$

Para determinar los valores de densidades poblacional y económicas se plantea lo siguiente:

$$\text{densidad} = f(CF, IE, RT, SR, DCBD, DSUB, ECU, DPT, DVH, DEI, DEC, DES)$$

Donde:

CF es una matriz de $m \times n$. Sea $cf_{ij} \in CF$, tal que cf_{ij} contiene las características físicas predominantes en ct_{ijt}

IE es un arreglo de $m \times n \times S$. Sea $ie_{ijt} \in IE$, tal que ie_{ijt} es la influencia de las celdas contiguas sobre ct_{ijt} , es decir $ct_{i+1, jt}, ct_{i-1, jt}, ct_{j+1, it}, ct_{j-1, it}, ct_{i-1, j-1t}, ct_{i+1, j-1t}$, así como $ct_{i+1, j+1t}$. Lo anterior se determinará si los usos de suelo us_{ijt} tienen algún tipo de urbanización. El tipo de vecindad es conocida como vecindad de Moore, misma que involucra a las ocho celdas contiguas a ct_{ijt} y sus respectivos usos de suelo us_{ijt} .

Sea el vector $E = (us_{i+1, j+1t}, us_{i-1, j+1t}, us_{j+1, it}, us_{j-1, it}, us_{i-1, j-1t}, us_{i+1, j-1t}, us_{i+1, j+1t}, us_{i-1, j-1t})$

De allí que se defina ie_{ijt} como:

$$ie_{ijt} = \begin{cases} 0 & \text{si y sólo si } E = \bar{0} \text{ esto es si } E = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) \\ 1 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

RT es un arreglo $m \times n \times S$ cuyos elementos rt_{ijt} reflejan la accesibilidad a por lo menos una de las vialidades principales contenidas en CT . Para definir dicha accesibilidad, se tiene que una área de influencia, espacio o buffer que rodea cada vialidad, tiene una distancia arbitraria λ desde la vialidad a la frontera de dicha área.

Por lo tanto se define rt_{ijt} como sigue:

Sea $d_{-rt_{ijt}}$ la distancia física mínima de ct_{ijt} a la vialidad principal más próxima. Entonces:

$$rt_{ijt} = \begin{cases} 1 & \text{si } d_{-rt_{ijt}} \leq \lambda \\ 0 & \text{si } d_{-rt_{ijt}} > \lambda \end{cases}$$

Sea AR el conjunto de áreas protegidas y zonas donde la urbanización esté prohibida por decisión gubernamental.

SR es un arreglo de $m \times n \times S$, tal que sus elementos sr_{ijt} están definidos como sigue:

$$sr_{ijt} = \begin{cases} 1 & \text{si } sr_{ijt} \in AR \\ 0 & \text{si } sr_{ijt} \notin AR \end{cases}$$

$DCBD$ es una matriz de $m \times n$, tal que sus elementos $dCBD_{ijt}$ son la distancia euclíadiana del centroide de ct_{ijt} al centroide del distrito central o CBD.

$DSUB$ es un arreglo de $m \times n \times S$, tal que sus elementos $dSUB_{ijt}$ son la distancia euclíadiana del centroide de ct_{ijt} al centroide del subcentro de actividad económica más cercano.

Sea ECU un vector de tamaño T que contiene los valores representativos de la etapa histórica de la ciudad. Los valores $ecu_t \in ECU$ se definen como sigue:

$$ecu_t = \frac{1}{\sqrt{u} + (b_0 b_1^t)} \quad \text{Donde: } t = 1, \dots, T \text{ periodos, con } T = S + R \text{ (periodos históricos más periodos futuros).}$$

u : Límite o cota superior que funge como umbral máximo del crecimiento urbano.

b_0, b_1 son parámetros de crecimiento urbano a estimar en cada ciudad específica.

DPT es un arreglo de $m \times n \times S$, tal que sus elementos dpt_{ijt} son las densidades poblacionales en la celda territorial ct_{ijt} en i, j en el periodo t , donde $t=1, \dots, S$

DVH es un arreglo de $m \times n \times S$, tal que sus elementos dvh_{ijt} son las densidades de vivienda en la celda territorial ct_{ijt} en i, j en el periodo t , donde $t=1, \dots, S$

DEI es un arreglo de $m \times n \times S$, tal que sus elementos dei_{ijt} son las densidades de empleo industrial en la celda territorial ct_{ijt} en i, j en el periodo t , donde $t=1, \dots, S$

DEC es un arreglo de $m \times n \times S$, tal que sus elementos dec_{ijt} son las densidades de empleo de comercio al por mayor en la celda territorial ct_{ijt} en i, j en el periodo t , donde $t=1, \dots, S$

DES es un arreglo de $m \times n \times S$, tal que sus elementos des_{ijt} son las densidades de empleo de servicios al productor en la celda territorial ct_{ijt} en i, j en el periodo t , donde $t=1, \dots, S$

Para determinar las densidades en el tiempo $t + 1$ (con $t > S$), es decir el valor futuro de dpt_{ijt} , dvh_{ijt} , dei_{ijt} , dec_{ijt} así como des_{ijt} , se usarán las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} dpt_{ijt+1} &= sr_{ijt} (\alpha_7 cf_{ij} + \alpha_6 ie_{ijt} + \alpha_5 rt_{ijt} + \alpha_4 dCBD_{ij} + \alpha_3 dSUB_{ijt} + \alpha_2 ecu_{t+1} + \alpha_1 dpt_{ijt} + \alpha_0) \\ dvh_{ijt+1} &= sr_{ijt} (\beta_7 cf_{ij} + \beta_6 ie_{ijt} + \beta_5 rt_{ijt} + \beta_4 dCBD_{ij} + \beta_3 dSUB_{ijt} + \beta_2 ecu_{t+1} + \beta_1 dvh_{ijt} + \beta_0) \\ dei_{ijt+1} &= sr_{ijt} (\gamma_7 cf_{ij} + \gamma_6 ie_{ijt} + \gamma_5 rt_{ijt} + \gamma_4 dCBD_{ij} + \gamma_3 dSUB_{ijt} + \gamma_2 ecu_{t+1} + \gamma_1 dei_{ijt} + \gamma_0) \\ dec_{ijt+1} &= sr_{ijt} (\delta_7 cf_{ij} + \delta_6 ie_{ijt} + \delta_5 rt_{ijt} + \delta_4 dCBD_{ij} + \delta_3 dSUB_{ijt} + \delta_2 ecu_{t+1} + \delta_1 dec_{ijt} + \delta_0) \\ des_{ijt+1} &= sr_{ijt} (\phi_7 cf_{ij} + \phi_6 ie_{ijt} + \phi_5 rt_{ijt} + \phi_4 dCBD_{ij} + \phi_3 dSUB_{ijt} + \phi_2 ecu_{t+1} + \phi_1 des_{ijt} + \phi_0) \end{aligned}$$

Donde los parámetros $\alpha_k, \beta_k, \gamma_k, \delta_k, \phi_k$ (con $k = 0, \dots, 7$) deben ser estimados por MC

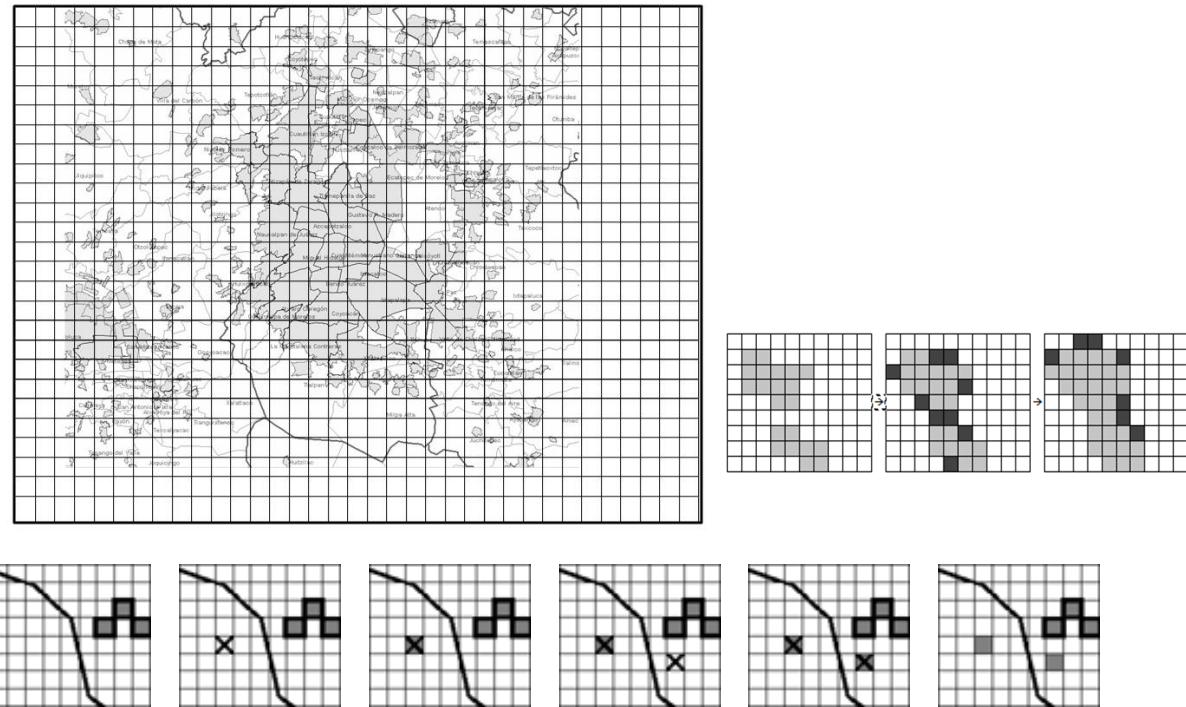
Para determinar el uso de suelo en el tiempo $t + 1$ (con $t > S$), es decir el uso de suelo futuro de ct_{ijt} se usará la siguiente expresión:

$$us_{ijt+1} = \begin{cases} 0 & \text{si } dpt_{ijt+1} + dei_{ijt+1} + dec_{ijt+1} + des_{ijt+1} = 0 \\ 1 & \text{si } \max(dpt_{ijt+1}, dei_{ijt+1}, dec_{ijt+1}, des_{ijt+1}) = dei_{ijt+1} \\ 2 & \text{si } \max(dpt_{ijt+1}, dei_{ijt+1}, dec_{ijt+1}, des_{ijt+1}) = dec_{ijt+1} \\ 3 & \text{si } \max(dpt_{ijt+1}, dei_{ijt+1}, dec_{ijt+1}, des_{ijt+1}) = des_{ijt+1} \\ 4 & \text{si } \max(dpt_{ijt+1}, dei_{ijt+1}, dec_{ijt+1}, des_{ijt+1}) = dpt_{ijt+1} \text{ y } dpt_{ijt+1} \leq \omega \\ 5 & \text{si } \max(dpt_{ijt+1}, dei_{ijt+1}, dec_{ijt+1}, des_{ijt+1}) = dpt_{ijt+1} \text{ y } \omega < dpt_{ijt+1} \leq \xi \\ 6 & \text{si } \max(dpt_{ijt+1}, dei_{ijt+1}, dec_{ijt+1}, des_{ijt+1}) = dpt_{ijt+1} \text{ y } dpt_{ijt+1} > \xi \end{cases}$$

Para la implementación del modelo matemático anterior, se construyó un modelo de simulación a través del diseño e implementación de un modelo basado en Autómatas Celulares (como se mencionó anteriormente, en el que se ha creado una rejilla (grid) para el área de estudio a través de modelos ráster en software ArcView.

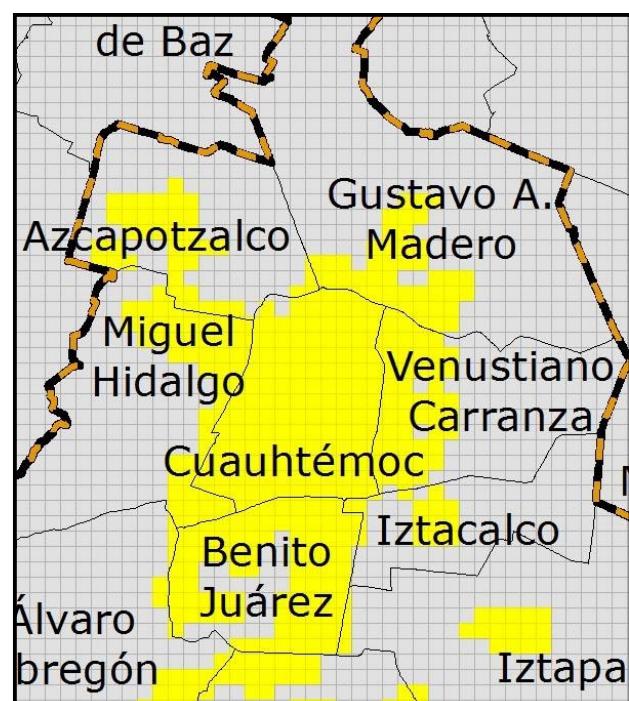
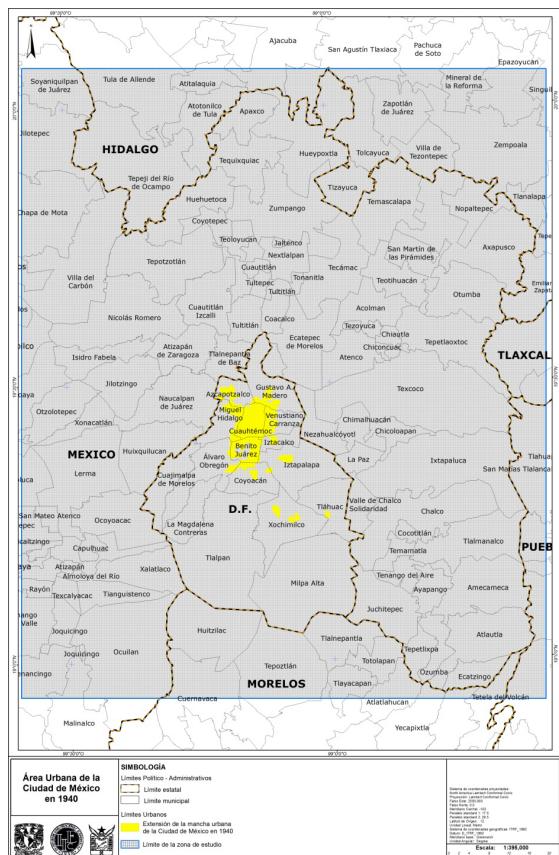
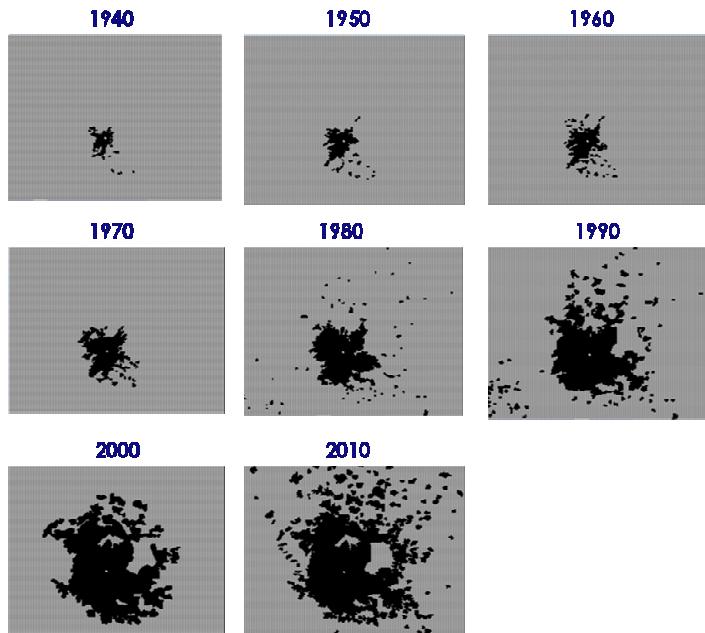
La rejilla se constituyó en una Base de Datos cuya unidad básica es una celda territorial, contando con cerca de 52,500 para todo el territorio de estudio. Dado que el modelo utilizará la metodología de Autómatas Celulares, es necesario considerar las unidades como elementos de matriz de renglón i y columna j . Para este efecto cada unidad de observación se denomina "celda territorial", que es una unidad físicamente equivalente a un cuadro perfecto de 250,000

m^2 ($\frac{1}{4} km^2$). Dado que el modelo utilizará visualmente un sistema de información geográfica (SIG), las Celdas Territoriales (ct's) se representarán en un sistema de modelo ráster en ArcView 10. En total se cuenta con 52,459 CT's cubriendo la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) mediante una rejilla de 251 renglones por 209 columnas.



Cada célula territorial contiene datos específicos con las características físico-territoriales que inciden de manera directa en los procesos de urbanización de la ciudad (tipo de suelo, restricciones al uso de suelo, inclinación del territorio, niveles de accesibilidad a las redes de transporte urbano, etc.).

La misma Base de Datos contiene también datos sociodemográficos y datos económicos para los períodos 1940, 1950, 1960, 1970, 1980, 1990, 2000 y 2010 que alimentan al modelo de simulación.



De esta manera, el modelo de simulación consiste en tomar las celdas territoriales a través de los datos mencionados y evaluar la probabilidad de urbanización. Para estimar la probabilidad del cambio de uso de suelo se usó a técnica de Regresión Logística Binomial.

El modelo genera datos de orden prospectivo de tal manera que siempre es posible verificar los datos del suelo urbanizado nuevo. Por otro lado, el modelo puede cambiar las variables de población, actividad económica (empleo), características físico-territoriales, redes de transporte y principalmente las restricciones al uso de suelo urbano para cualquier periodo de análisis, a fin de generar nuevas tendencias de crecimiento y expansión. En relación a las variables usadas en cada celda territorial, se tienen las siguientes:

Nombre
Variable Dependiente
Uso de suelo x CT
Actividad Económica y Residencial
Población Total
Viviendas Habitadas
Empleo Industrial
Empleo en Comercio
Empleo en Servicios
Empleo Total
Características Territoriales
Influencia Espacial (Vecindad)
Pendiente del territorio
Política Urbana y Gestión Gubernamental
Suelo Restringido a la Urbanización
Acceso a la Red de Transporte Principal
Estructura Policéntrica Urbana
Distancia de la CT al CBD
Distancia de la CT al Subcentro más cercano
Etapas de Crecimiento Urbano
Etapa de Crecimiento de la Ciudad de México

4. RESULTADOS PRELIMINARES SOBRE LA OPERACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO Y EXPANSIÓN DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

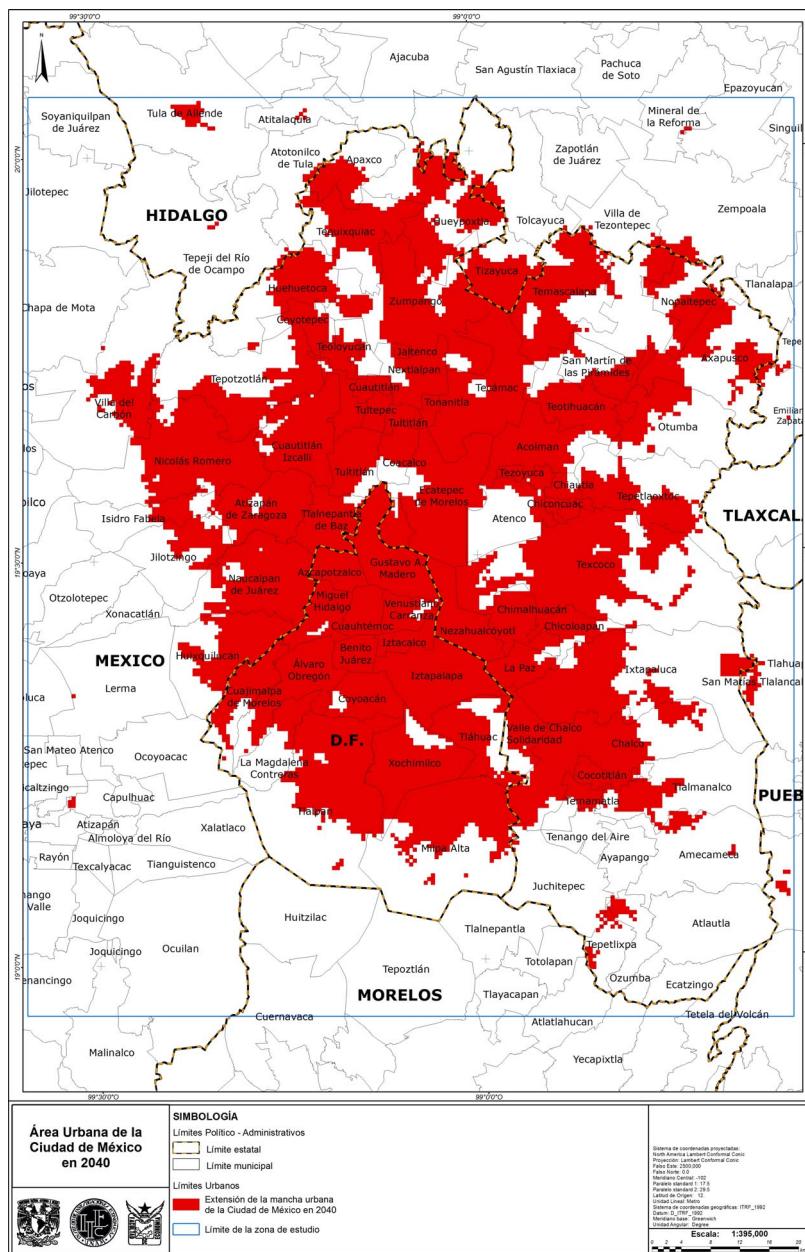
Las principales áreas urbanizadas en 2040, de acuerdo a los resultados del modelo, se darían más específicamente en delegaciones del sur tales como Xochimilco, Tlalpan y Milpa Alta, abarcando municipios del Estado de México como Tepetlaoxtoc, Chiautla, Chiconcuac, Apaxco, Tequixquiac, Isidro Fabela, Jilotzingo, Temamatla, Cocotitlán, Tlalmanalco, Zumpango, Jaltenco, Nextlalpan, entre otros.

En el norte las diversas áreas urbanas ubicadas como “manchas” o como “partes del plato roto”, comenzarían a unificarse en una área urbana continua, esto es, como corredores urbanos integrados al área urbana principal. Los principales municipios al norte que protagonizarían este fenómeno serían Tepotzotlán-Cuautitlán Izcalli-Coyotepec-Teoloyucan-Huehuetoca, por otro lado Zumpango-Jaltenco-Nextlalpan-Tecámac-Tizayuca, asimismo Apaxco-Tequixquiac-Hueyopoxla, como los más importantes. (ver mapa 1).

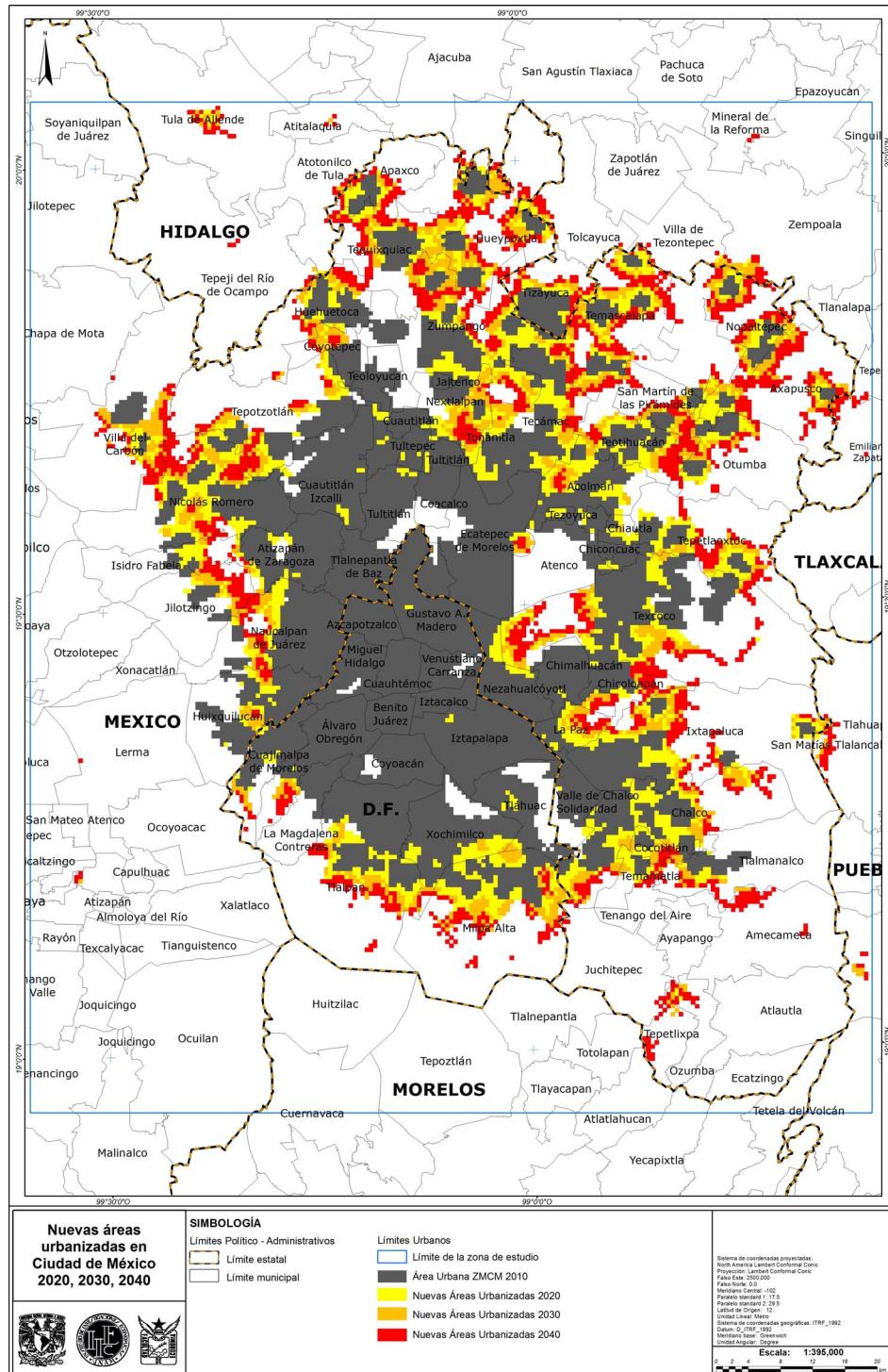
Al poniente de la ciudad se daría un fenómeno similar con áreas de pequeñas comunidades urbanas asentadas en los municipios de Tepotzotlán-Nicolás Romero-Isidro Fabela-Jilotzingo-Naucalpan de Juárez-Huixquilucan, presentando un continuo urbano.

Similar caso al oriente de la ciudad, donde serían notorios crecimientos y formaciones urbanas continuas principalmente en los municipios de Valle de Chalco Solidaridad-Chalco-Temamatla-Cocotitlán-Tlalmanalco. Por otro lado sucedería del mismo modo con Chimalhuacán-Texcoco-Chicoloapan-Tepetlaoxtoc-Chiautla-Chiconcuac-Tezoyuca-Acolman-Teotihuacán.

Los crecimientos en diferentes áreas de la ciudad cuentan con un patrón similar: la periferia metropolitana es la que tendrá mayoritariamente la expansión de las nuevas áreas urbanas (NAU). Prácticamente en todos los puntos cardinales existe expansión pero claramente al norte, al sur y al oriente de la ciudad se dan mayores crecimientos dado el aprovechamiento de las pocas áreas urbanizables aún existentes. (véase mapa 2).



Mapa 1. Área Urbana de la Ciudad de México en 2040 Fuente: Elaboración Propia



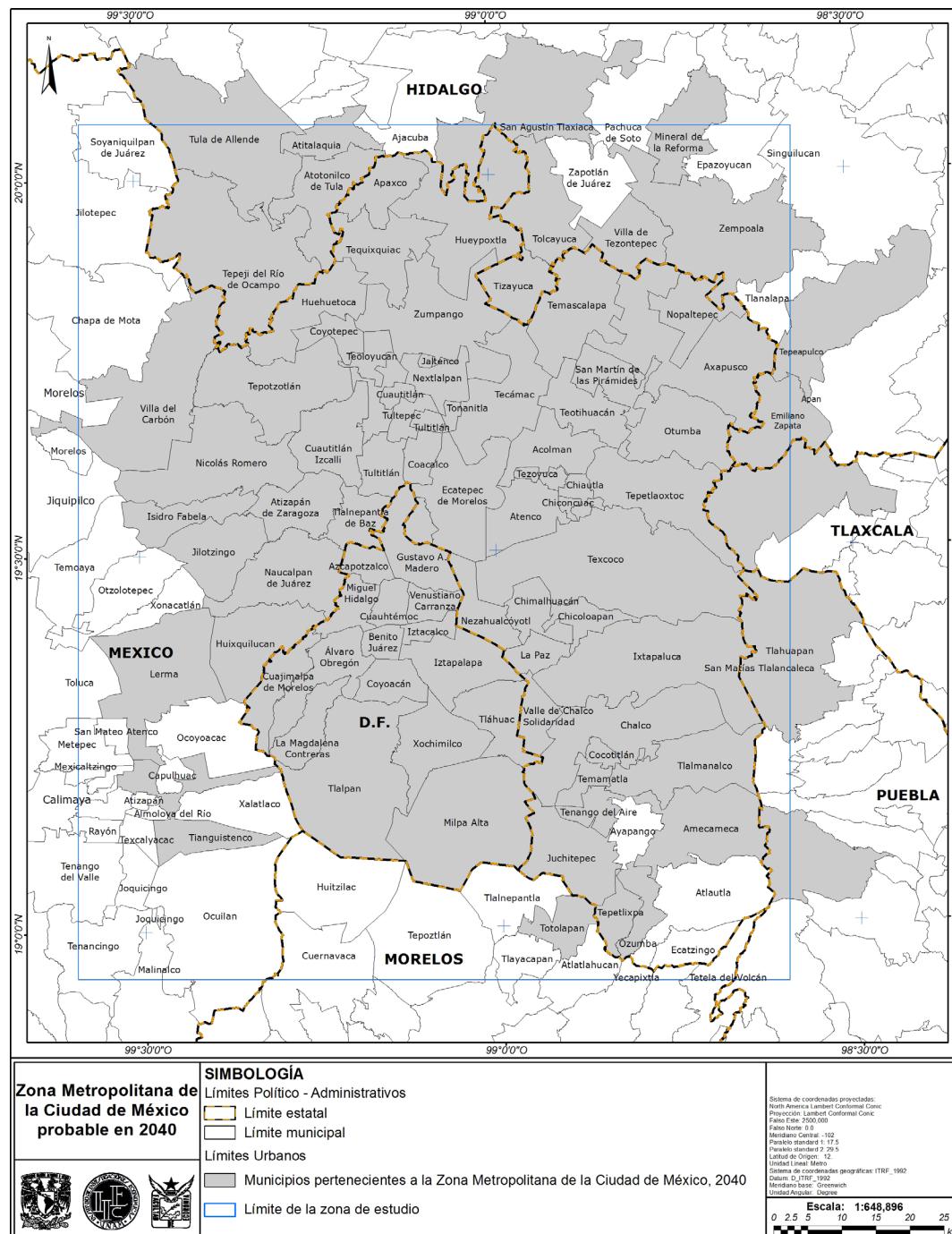
Mapa 2. Nuevas áreas urbanizadas en 2020, 2030 y 2040 Fuente: Elaboración Propia

Algunas localidades urbanas como San Matías Tlalancaleca, colindante con el estado de Puebla o como Axapusco colindante con el estado de Hidalgo incrementarían sus áreas de manera muy notable. (ver mapa 1).

En relación a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) de acuerdo a las nuevas áreas ocupadas al 2040, quedaría integrada por 90 unidades político-administrativas (entre delegaciones políticas y municipios) del Distrito Federal, Estado de México, Hidalgo, Tlaxcala, Puebla y Morelos. A continuación se muestra en la tabla 1 con la posible Zona Metropolitana de la Ciudad de México. (Ver tabla 1 y Mapa 3).

ZMCM 2040		ZMCM 2040		ZMCM 2040	
Edo	Mun	Edo	Mun	Edo	Mun
1 Distrito Federal	Álvaro Obregón	31 México	Apaxco	61 México	Nopaltepec
2 Distrito Federal	Azcapotzalco	32 México	Atenco	62 México	Otumba
3 Distrito Federal	Benito Juárez	33 México	Atizapán de Zaragoza	63 México	Ozumba
4 Distrito Federal	Coyoacán	34 México	Axapusco	64 México	Papalotla
5 Distrito Federal	Ouajimalpa de Morelos	35 México	Chalco	65 México	San Martín de las Pirámides
6 Distrito Federal	Ouauhtémoc	36 México	Chiautla	66 México	Tecámac
7 Distrito Federal	Gustavo A. Madero	37 México	Chicoloapan	67 México	Temamatlán
8 Distrito Federal	Iztacalco	38 México	Chiconcuac	68 México	Temascalapa
9 Distrito Federal	Iztapalapa	39 México	Chimalhuacán	69 México	Tenango del Aire
10 Distrito Federal	La Magdalena Contreras	40 México	Coacalco de Berriozábal	70 México	Teoloyucan
11 Distrito Federal	Miguel Hidalgo	41 México	Cocotitlán	71 México	Teotihuacán
12 Distrito Federal	Milpa Alta	42 México	Coyotepec	72 México	Tepetlaotlán
13 Distrito Federal	Tláhuac	43 México	Quauitlán	73 México	Tepetlixpa
14 Distrito Federal	Tlalpan	44 México	Quauitlán Izcalli	74 México	Tepotzatlán
15 Distrito Federal	Venustiano Carranza	45 México	Ecatepec de Morelos	75 México	Tequixquiac
16 Distrito Federal	Xochimilco	46 México	Huehuetoca	76 México	Texoco
17 Hidalgo	Atitalaquia	47 México	Hueyopoxtlá	77 México	Tezoyuca
18 Hidalgo	Atotonilco de Tula	48 México	Huixquilucan	78 México	Tianguistenco
19 Hidalgo	Emiliano Zapata	49 México	Isidro Fabela	79 México	Tlalmanalco
20 Hidalgo	Mineral de la Reforma	50 México	Ixtapalua	80 México	Tlalnepantla de Baz
21 Hidalgo	San Agustín Tlaxiaca	51 México	Jaltenco	81 México	Tonanitla
22 Hidalgo	Tepeapulco	52 México	Jilotzingo	82 México	Tultepec
23 Hidalgo	Tepeji del Río de Ocampo	53 México	Juchitepec	83 México	Tultitlán
24 Hidalgo	Tizayuca	54 México	La Paz	84 México	Valle de Chalco Solidaridad
25 Hidalgo	Tolcayuca	55 México	Lerma	85 México	Villa del Carbón
26 Hidalgo	Tula de Allende	56 México	Melchor Ocampo	86 México	Zumpango
27 Hidalgo	Villa de Tezontepec	57 México	Naucalpan de Juárez	87 Morelos	Totolapan
28 Hidalgo	Zempoala	58 México	Nextlalpan	88 Puebla	San Nicolás de los Ranchos
29 México	Acolman	59 México	Nezahualcóyotl	89 Puebla	Tlahuapan
30 México	Amecameca	60 México	Nicolás Romero	90 Tlaxcala	Calpulalpan

Tabla 1. Municipios y delegaciones que conformarían la ZMCM en 2040 Fuente: Elaboración Propia



Mapa 3. ZMCM probable en 2040 Fuente: Elaboración Propia

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, Guillermo y Concepción Alvarado**, “La reestructuración del espacio urbano de la ciudad de México. ¿Hacia la metrópoli multinodal?” en Procesos Metropolitanos y Grandes Ciudades, UNAM, Miguel Ángel Porrúa, Cámara de Diputados, México, 2004.
- Asuad, Normand E.**, Un ensayo teórico y metodológico sobre el proceso de concentración económica espacial y su evidencia empírica en la región económica megalopolitana de 1970 a 2000 y sus antecedentes, Tesis doctoral, México, UNAM, 2007.
- Christaller, Walter**, Central places in Southern Germany. Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall. 1966.
- Delgado, Javier y Manuel Suárez**, “La expansión urbana probable de la Ciudad de México. Un escenario pesimista y dos alternativos para el año 2020”, 2006. Estudios Demográficos y Urbanos. Vol. 22, no. 1 (64). pp 101-142.
- García, Miguel Ángel e Iván Muñiz**, “Descentralización del empleo: ¿Compactación policéntrica o dispersión? El caso de la región metropolitana de Barcelona 1986-1996”, Documento de trabajo del departamento de Economía Aplicada, Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, España, 2005.
- , “El impacto espacial de las economías de aglomeración y su efecto sobre la estructura urbana. El caso de la industria en Barcelona 1986-1996”, Documento de Trabajo del departamento de Economía Aplicada, Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, España, 2005.
- Garza, Gustavo**, El proceso de Industrialización en la Ciudad de México (1821-1970), México, Colegio de México, Centro de Estudios Demográficos y de Desarrollo Urbano, 1985.
- Giuliano, Genevieve y Kenneth Small**, “Subcenters at the Los Angeles Region”, Regional Science and Urban Economics, 21, 1991.

Jantz, Claire A. & others. "Using the SLEUTH Urban Growth Model to simulate the Impacts of Future Policy Scenario on Urban Land Use in the Baltimore-Washington Metropolitan Area", 2003. Environment and Planning B: Planning and Design 2003, Vol 30, pp 251-271

McDonald, John F., "The identification of urban employment subcenters," Journal of Urban Economics, Vol. 21, 1987, pp. 242-258.

Muñiz, Iván, Miguel Ángel García y Anna Galindo, "¿Es Barcelona una ciudad policéntrica?", Documento de trabajo del departamento de Economía Aplicada, Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, España, 2003.

Pumarino, Gabriel, "Nuevo Enfoque para la Planificación en Áreas Metropolitanas: Hacia un enfoque alternativo". Revista Eure.

Ramírez, Roberto, "La expansión metropolitana de la Ciudad de México y la dinámica de su estructura policéntrica. Un análisis de las fuerzas de dispersión y concentración económicas como factores de crecimiento urbano entre 1994 y 2004", libro en edición (IIEc-UNAM), 2012.

Richardson, Harry W., Economía Regional y Urbana, Alianza Editorial, Madrid, España, 1986.

White, Roger, Integrated Modelling of Population, Employment and Land Use Change with a Multiple Activity Based Variable Grid Cellular Automaton, International Journal of Geographical Information Sciences, 2011 (In press).