

## CIUDAD Y TERRITORIO

## ESTUDIOS TERRITORIALES

ISSN(P): 1133-4762; ISSN(E): 2659-3254

Vol. LIV, N° 214, invierno 2022

Págs. 969-984

<https://doi.org/10.37230/CyTET.2022.214.9>

CC BY-NC-ND



# Modelo de simulación para la transición del uso suelo urbano en la ocupación del espacio territorial: zona Metropolitana Pachuca, Hidalgo (México)

Oscar MONTAÑO-ARANGO <sup>(1)</sup>Oscar Saúl HERNÁNDEZ-BARRERA <sup>(2)</sup>Joselito MEDINA-MARÍN <sup>(3)</sup>José Ramón CORONA-ARMENTA <sup>(4)</sup>Héctor RIVERA-GÓMEZ <sup>(5)</sup>Antonio Oswaldo ORTEGA-REYES <sup>(6)</sup><sup>(1)</sup> Autor de correspondencia<sup>(3)</sup> <sup>(4)</sup> <sup>(5)</sup> <sup>(6)</sup> Profesor-Investigador<sup>(2)</sup> Profesor. Director de Gestión Urbana, Secretaría de Obras Públicas y Ordenamiento Territorial del Estado de Hidalgo<sup>(1)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(3)</sup> <sup>(4)</sup> <sup>(5)</sup> <sup>(6)</sup> Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

**Resumen:** Se presenta un modelo de simulación basado en redes neuronales artificiales que permite comprender la dinámica de transición en el espacio-tiempo del uso de suelo en un área representativa de la Zona Metropolitana de Pachuca. Se analizaron y construyeron bases de datos alfanuméricos geoespaciales, con información de 2 periodos, 2007 y 2014. Los resultados se presentan en 3 escenarios respecto a los patrones de comportamiento de la expansión urbana del año 2014, el escenario base tuvo un acercamiento del 55%; con una amplitud de 15% se elevó al 80%; y con el 35% a 95%. El conjunto de variables simuladas, muestra que los datos son confiables y el modelo es capaz de representar el comportamiento del uso de suelo en el espacio-tiempo. Un punto crítico fue el proceso de refinamiento y categorización de las variables de entrada y la información para correlacionar los valores de salida.

Recibido: 28.12.2021; Revisado: 01.06.2022

Correo electrónico: [omontano@uaeh.edu.mx](mailto:omontano@uaeh.edu.mx) ; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4093-2529>Correo electrónico: [ohernandez@uaeh.edu.mx](mailto:ohernandez@uaeh.edu.mx) ; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3358-196X>Correo electrónico: [jmedina@uaeh.edu.mx](mailto:jmedina@uaeh.edu.mx) ; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0937-8707>Correo electrónico: [jcorona@uaeh.edu.mx](mailto:jcorona@uaeh.edu.mx) ; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7157-1634>Correo electrónico: [hriver06@hotmail.com](mailto:hriver06@hotmail.com) ; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2903-2909>Correo electrónico: [oswwaldoo@yahoo.com.mx](mailto:oswwaldoo@yahoo.com.mx) ; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5825-9742>

Los autores agradecen los comentarios y sugerencias realizados por los evaluadores anónimos, que han contribuido a mejorar y enriquecer el manuscrito original.

**Palabras clave:** Uso de suelo urbano; Categorización de variables; Redes neuronales artificiales; Modelo de simulación; Escenarios de transición.

## Simulation model of the transition of urban land use in the occupation of territorial space. Case: Metropolitan Zone of Pachuca, Hidalgo (Mexico)

**Abstract:** This work presents a simulation model based on artificial neural networks, which allows understanding the transition dynamics in space-time of land use, in a representative area of the Metropolitan Area of Pachuca. Geospatial alphanumeric databases were analyzed and built, with information from 2 periods, 2007 and 2014. Results are presented in 3 scenarios with respect to the behavior patterns of urban expansion in 2014: the base scenario had an approximation of 55%; with an amplitude of 15% it rose to 80%; and with 35% to 95%. The set of simulated variables shows that the data are reliable and the model is capable of representing the behavior of land use in space-time. A critical point was the process of refining and categorizing the input variables and the information to correlate the output values

**Keywords:** Use of urban land; Categorization of variables; Artificial neural networks; Simulation model; Transition scenarios.

### 1. Introducción

La conformación de los conglomerados urbanos denominados ciudades implican la articulación de diversos elementos, como el uso de suelo, que a menudo representan dos vertientes: 1) la dificultad para equilibrar las demandas del crecimiento de la mancha urbana y 2) el deseo de preservar el medio ambiente natural, los cuales están inscritos en un espacio y tiempo determinado en vías de garantizar los atributos que el concepto de calidad de vida significa.

El uso de suelo, en el devenir de los tiempos, ha implicado un análisis de la forma de expresión de los satisfactores que una sociedad requiere para su reproducción social, sin embargo, esta concurrencia en muchas ocasiones no homogénea y lejos de ser óptima, limita o condiciona el desarrollo de las ciudades. En este sentido, surgen interrogantes en torno a los beneficios y consecuencias de la modificación del uso de suelo y su impacto en la conformación de una ciudad, por lo que es necesario contar con herramientas adecuadas para integrar y evaluar una gran cantidad y diversidad de información, como un medio de obtener respuestas fiables.

El generar un modelo que utilice relaciones físicas para determinar la transición a través del tiempo en el territorio se encuentra condicionado a la disposición de información para realizar los análisis necesarios que permitan la toma de decisiones al respecto, la denostación hacia el concepto de movilidad, accesibilidad, disponibilidad

de infraestructura y los actores que a la par se gestan, juegan un papel transcendental dentro de la llamada sostenibilidad urbana. En el presente artículo se seleccionaron variables que conciernen con la localización, forma, transformación y dimensión de los usos de suelo, para definir relaciones mutuas de convivencia o segregación, con el objeto de predecir su comportamiento en escenarios proyectados y ser consideradas en el proceso de planeación del territorio. En este sentido, se hace un análisis de la composición de la estructura urbana en términos de uso de suelo que presenta una ciudad media a través del comportamiento de un área representativa de la Zona Metropolitana de Pachuca (ZMP); así mismo, se ponderan los datos, se generan matrices con información alfanumérica geoespacial y se modela por medio de las reglas de operación de las Redes Neuronales Artificiales, a fin de conocer los cambios en el uso de suelo y su expresión en el territorio, lo anterior, permite definir escenarios con diversos grados de precisión del comportamiento de transición, que, combinado con las capacidades de los sistemas de información geográfica, contribuye a la toma de decisiones en el aprovechamiento del territorio.

El modelo de simulación de transición urbana del uso de suelo crea las bases para el análisis subsecuente del territorio, como un componente esencial en las investigaciones sobre las ciudades, ya que permite proyectar y evaluar las posibles consecuencias de la puesta en marcha de políticas públicas, además de otras acciones sobre el uso del suelo y su expresión en el territorio.

## 2. Marco Teórico

### 2.1. Suelo urbano

De acuerdo con QUINTANA & OJEDA & GARCÍA (2018), las ciudades tienen distintos usos de suelo (habitacional, comercial, servicios e industrial), así como clasificaciones en función de las características inmobiliarias establecidas por los planes de desarrollo, ubicación y preferencias de los consumidores y usuarios. Por otro lado, FERNÁNDEZ (2019) menciona que el suelo urbano posee características particulares que lo diferencian de cualquier otro bien, que hacen que su delimitación y determinación del valor sea un proceso complejo. Por tanto, debe considerarse la doble función del suelo urbano; este aparece como un factor de producción, indispensable en el proceso de transformación, por ejemplo, tratándose del espacio que requieren la industria, el comercio y las oficinas, o como un bien básico, cuando se utiliza para vivienda o recreación (MOLINER, 2005). Esta doble función del suelo urbano, que además es un bien escaso, provoca que exista competencia entre los usuarios potenciales de este bien. Es precisamente este proceso de competencia el responsable de la determinación del valor del suelo, pero el proceso es complicado, por la interdependencia de los usuarios potenciales (LÓPEZ, 2014; DILLON & COSSIO & POMBO, 2010).

Se tiene que el crecimiento acelerado y desarticulado de la urbanización provoca conflictos de usos de suelo, ambientales y de imagen urbana. Un abordaje, desde una perspectiva espacial, ha desarrollado avances significativos en la sistematización de procedimientos analíticos, con la finalidad de determinar la evolución de los patrones de distribución espacial del uso de suelo para atenuar el impacto, siendo la tecnología de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) de suma importancia para la planificación (HUMACATA, 2019).

El sector público también tiene una enorme influencia en el valor y uso del suelo, particularmente a través de dos formas: con la planificación del uso del suelo, y por medio de la construcción de infraestructura y equipamiento urbano.

Una de las herramientas que utiliza el sector público en la planificación del crecimiento urbano es la zonificación de usos del suelo (SONAGLIO & SILVA, 2009), la cual, de acuerdo con MENDOZA & ALCÍBAR (2020):

“busca evitar que los nuevos desarrollos interfieran negativamente con los existentes, así como preservar el carácter de la comunidad y los valores identitarios de su territorio, además de implementar planes y políticas gubernamentales relacionadas con el desarrollo económico sostenible y la renovación urbana”.

La zonificación de usos del suelo no elimina el mercado, sólo restringe su operación y, en consecuencia, evita que el proceso de competencia se desarrolle de manera irracional y por lo tanto tenga efectos negativos en el funcionamiento de la ciudad (CASTILLO, 2005).

### 2.2. Modelos de simulación urbana

El uso del suelo y su manifestación en el territorio consideran diversos elementos en su integración, como la infraestructura, transporte, características físicas del sitio, entre otras, cuyas interrelaciones sirven para entender los procesos y su funcionamiento, así como los cambios que tienen lugar y su comportamiento futuro por la incidencia de nuevos integrantes (nuevos usos del suelo) en áreas semiconsolidadas o consolidadas (SUÁREZ & DELGADO, 2010).

Lo anterior ha sido motivo de análisis y generación de diversos modelos, no solo a nivel teórico sino contrapunteando con la realidad, tratando de entender las diversas relaciones complejas e identificando aquellas con una significancia preponderante en la articulación de los territorios para simular los comportamientos como sustento para tomar las mejores decisiones (AGUILERA & al., 2009; SOLÁ & RUBIO, 1972). MATURANA & al. (2021) señalan que las metodologías de simulación del crecimiento urbano adquieren relevancia para comprender y aportar en futuros escenarios. De esta manera, la construcción de modelos de simulación obedece a una lógica particular en un momento determinado, donde para su conceptualización se identifican premisas para analizar su comportamiento y su posterior interpretación como lo plantea AGUILERA (1999):

1. Encontrar un sistema teórico que permita identificar el fenómeno que se estudiará como un conjunto de estados identificables, tanto en el espacio como en el tiempo. Los habitantes en diferentes sectores de la ciudad en distintos años o bien, el número de personas en un sector de la ciudad en diferentes horas del día, son ejemplos de estados identificables espacio-temporales.

2. En cualquier caso, es condición indispensable definir variables que determinen explícitamente los estados. Estas variables reciben el nombre de variables de estado. El número de habitantes por kilómetro cuadrado por unidad de tiempo, es una variable posible.
3. Establecer las relaciones que lleva al sistema urbano a cambiar de un estado a otro, o bien, que le permita permanecer en el mismo estado conforme transcurre el tiempo. Por ejemplo, un centro comercial o una entidad de gobierno de una ciudad, cambia de estado según la hora del día. Existe una relación entre el número de personas en dicho espacio y la hora específica.
4. Definir una relación cuantitativa que permita precisar el cambio de estados en función explícita del tiempo, ya sea por medio de razones de cambio (el cambio de la variable de estado en función del cambio en una unidad de tiempo), o bien, estableciendo una ecuación que defina de forma explícita el valor de una variable de estado para cualquier tiempo dado.

Hay modelos matemáticos que en algunos casos se han traducido en paquetes informáticos de última generación que permiten entender de mejor manera los procesos a través de modelos de simulación, sin embargo, su aplicabilidad es acotada, debido a que su concepción difiere de la realidad de otros contextos. Las aportaciones son excelentes referentes para este estudio, por lo que se describen algunos modelos representativos que puntualizan esta relación.

### 2.2.1. Modelo MUSSA

MUSSA es el software llamado Modelo de Uso de Suelos de Santiago, propiedad del gobierno de Chile y desarrollado por la Universidad de Chile (MINISTERIO DE PLANEACIÓN Y COOPERACIÓN, 2003), proyecta el comportamiento del mercado inmobiliario urbano y permite predecir sus estados de equilibrio económico ante múltiples escenarios; macroeconómicos y regulatorios.

### 2.2.2. Modelos para Uso de Suelo y Transporte

Son modelos asociados, que se desarrollan para comprender la interacción del uso de suelo y el transporte, en un contexto macroeconómico

consistente. El argumento teórico básico que utiliza, es que esta interacción puede ser explicada por las decisiones de la vida diaria de las personas y las actividades que desean realizar. Dado que estas actividades están espacialmente dispersas, de una manera descrita por el patrón de uso de la tierra, y para llegar a ellos, las personas requieren viajar, la interacción se lleva a cabo de dos maneras: en primer lugar, el patrón de localización de las actividades induce un patrón de viaje, y presupone un costo por el desplazamiento, y segundo, que la localización de cada actividad es dependiente del sistema de transporte, y se define un costo diferenciado por ese ejercicio planificado de actividades.

### 2.2.3. Modelo Land-Use Conflict Identification Strategy (LUCIS)

Modelo de análisis geoespacial, utilizado para la resolución de conflictos en la asignación de usos de suelo (CARR & ZWICK, 2007), a través de operaciones de álgebra de mapas "Modelbuilder", basado en procesos de asignación de utilidad múltiple o sencilla, que se puede acoplar a una variedad de circunstancias y situaciones, permitiendo evidenciar los comportamientos probables antes y después del aprovechamiento del territorio. Donde la representación modélica mínima de una ciudad demanda dos capas: la primera para las unidades de la infraestructura física de la ciudad, y la otra, para los movimientos de los individuos dentro de la ciudad. Los elementos de infraestructura urbana (unidades de tierra, segmentos de la red vial, edificios, etc.), son considerados como fijos, mientras los individuos son potencialmente libres de cambiar su localización dentro de la ciudad.

### 2.2.4. Modelo UrbanSim

Modelo diseñado a mediados de la década de los 90, su primera implementación como prototipo de trabajo fue en Oregón en el año de 1998, es un paquete informático de código abierto. Su operación ha sido en las tareas de planificación en los EE.UU., Europa, Asia y África, también es utilizado por organismos dedicados a las labores de planificación y como líneas de investigación en instituciones de nivel superior.

El modelo UrbanSim se basa en simular los mercados, impactos del uso del suelo y planes de transporte en una escala metropolitana, desde la base de la parcela a la metrópoli. Es una plataforma de simulación para: apoyar la

planificación y el análisis del desarrollo urbano, la incorporación de las interacciones entre el uso del suelo, el transporte, la economía y el medio ambiente (WADDELL, 2002).

### 2.2.5. Modelos de Sistemas Dinámicos basados en Autómatas Celulares

Para reproducir el resultado de las correlaciones del conjunto de estructuras y procesos espaciales en el ámbito de la simulación urbana, se ha recurrido a la modelación de su comportamiento, a través de instrumentos que permiten simular espacialmente esta dinámica (HENRÍQUEZ & AZÓCAR, 2007; BARREIRA GONZÁLEZ & GÓMEZ DELGADO & AGUILERA BENAVENTE, 2015), recurriendo a modelos basados en Autómatas Celulares, debido a su capacidad para reproducir sistemas complejos como el crecimiento urbano; donde el tiempo y el espacio son fundamentales en la conformación de las estructura urbana (SANTOS, 2000).

### 2.2.6. Modelos de Redes Neuronales Artificiales “RNA”

Los modelos de crecimiento de la ciudad basados en RNA (GIS AND CHIPS, 2013), han sido capaces de identificar relaciones complejas no lineales entre un conjunto de entradas. Asimismo, se han aplicado para establecer las condiciones de mutabilidad y cambio de uso de suelo de diversas zonificaciones (GÓMEZ, 2020), por lo que su utilización como herramienta de predicción del crecimiento de núcleos urbanos, cada día tiene mayor trascendencia; particularmente, por la capacidad de representación de la conjunción del modelado espacial y temporal de los fenómenos concurrentes que se llevan a cabo en el territorio.

## 3. Materiales y Método

El estudio de la conformación del medio urbano y los procesos que impulsan su transformación y expresión en el territorio, requieren del manejo y uso de análisis espaciales, estadísticos y técnicas de SIG. Para comprender la dinámica compleja de estos procesos y sus múltiples factores causales, la investigación consideró lo siguiente:

- Explorar los diversos mecanismos que condicionan los cambios de uso del suelo y las variables sociales, jurídicas, políticas, económicas y espaciales que conducen a su conformación.
- Identificar la disponibilidad de infraestructura básica que derive en la permisibilidad de los cambios en el uso del suelo.
- Evaluar factores contextuales sobre los patrones de desarrollo y uso del suelo.
- Identificar modelos de cambio de uso del suelo usando parámetros simples, como: extensión de las áreas urbanas, principales vías de transporte, distancia a los lugares de trabajo, bienes e insumos, condiciones topográficas y la existencia de tierras en situación especial.

Las herramientas que permiten realizar un análisis del espacio urbano incorporando variables de interacción en el territorio (población, vivienda, transporte, vialidades) son los SIG, que son indispensables para entender y visualizar la problemática existente en el entorno urbano y las condiciones que se puedan presentar a futuro (MAANTAY & ZIEGLER, 2006; SERRA, 1996), debido a que permiten capturar datos geográficos en diferentes formatos, ya sea mapas digitalizados o imágenes de satélite, almacenar grandes volúmenes de datos, realizar análisis implementando algoritmos complejos y la aplicación de modelaciones para la simulación de los procesos urbanos.

En este trabajo se utilizó el software ArcGIS, el cual es uno de los programas más utilizados actualmente por empresas y administraciones públicas para el análisis geoespacial. El software cuenta con los módulos ArcMap, ArcToolbox y ArcCatalog, para un mejor desempeño. ArcGIS utiliza datos geográficos de diferentes fuentes, crea bases de datos geoespaciales y permite el análisis espacial (ALATORRE, L.C. & al., 2015), la edición geométrica, el análisis de topología, entre otras funciones.

Para la integración de la información se revisaron fuentes provenientes de instituciones públicas, medios de comunicación impresa y digital, así como levantamiento en campo para conformar escenarios en tiempos T1 y T2. Identificada la información se procedió a la digitalización, que es una forma de conversión de datos analógicos a digitales, a través de tres etapas sucesivas: preparación de datos, digitalización y captura de datos. El proceso de digitalización implicó lo siguiente:

- La preparación y obtención de la información.
- Manejo y uso de software.
- Conversión de información análoga a digital.
- Georreferenciación de los datos.
- Mapeo de los valores obtenidos mediante los RNA.

Mediante el uso de ArcMap fue posible añadir información del material analógico a la digital, obteniendo como resultado *shapefiles* con información del área de estudio, para su posterior análisis. El mapa a nivel de lote en formato DXF, se convirtió a *shapefiles* para realizar un proceso de georreferenciación y generación de información tabular.

Para la definición del comportamiento del fenómeno de transición del uso de suelo existen algunos modelos matemáticos que han sido utilizados regularmente para su solución, como los autómatas celulares y las redes neuronales artificiales, así mismo, existen modelos basados en técnicas de evaluación multicriterio (GÓMEZ & RODRÍGUEZ, 2012), que consisten en un conjunto de elementos técnicos utilizados en la toma de decisiones multidimensional, para evaluar una serie de criterios predefinidos, para la toma de decisiones.

A continuación, se describe la metodología utilizada para desarrollar el modelo de simulación, que permite identificar cómo se comporta el uso de suelo de manera temporal y espacial, observando el fenómeno de transición, a fin de identificar un patrón que permite caracterizar su conducta desde un Tiempo 1 (T-1), un Tiempo Proyectado 1 (TP-1), un Tiempo 2 (T-2) y un Tiempo Proyectado 2 (TP-2):

1. Identificación de la zona de estudio.
2. Investigación de las teorías respecto a los modelos espaciales en la conformación de la estructura urbana, que dan la pauta para identificar variables en el proceso de apropiación y diferenciación del territorio.
3. Caracterización de los elementos que hacen posible el fenómeno de la transición de uso de suelo.
4. Estudio de los paquetes informáticos utilizados en la modelación de la dinámica urbana.
5. Definición de las variables y clases que representen el fenómeno de transición del uso de suelo.

6. Acercamiento con profesionales relacionados con los temas de la dinámica urbana, a fin de caracterizar las variables que participan en la definición del uso de suelo.
7. Identificación y procesamiento de la información alfanumérica geoespacial proveniente de la administración pública, que permita establecer los comparativos en un tiempo T-1 y T-2, acotados a la Zona Metropolitana de Pachuca.
8. Utilización del software SIG para el tratamiento y gestión de los datos levantados en campo, la integración de una base de datos geoespacial y para la diferenciación del T-1 a TP-1 y T-2 a TP-2. En esta investigación se trabajó con ArcGIS de ESRI, debido a que permite el tratamiento de información geográfica en diversos formatos.
9. Conformación de una matriz numérica, para tipificar las clases y las variables como representación tabular del uso de suelo. Para su procesamiento se usó el software Matlab R2014a.
10. Diseño de algoritmos para la generación de datos de entrada, para el uso del modelo matemático de la RNA, provista en el software Matlab.
11. Diseño de la RNA para identificación de la clase en un T-1. Con la RNA seleccionada se realiza la simulación de comportamiento proyectado por variable y por clase en un TP-1 y en un T-2.
12. Diseño de la RNA para la simulación del comportamiento de la clase en un TP-2, generando información tabular compatible para una representación espacial.
13. Comparación de resultados en un TP-2 espacialmente, con la información alfanumérica espacial identificada en un T-2.

#### 4. Análisis y Resultados

El modelo de simulación desarrollado se basa en la desagregación de subsistemas urbanos que confluyen en un espacio y tiempo determinado, incorpora las distribuciones espaciales del uso de suelo y es concebido bajo las condicionantes en la disposición de información gubernamental, retomando los criterios de conformación y captura de datos, a fin de disponer de una configuración flexible, involucrando la caracterización del marco

jurídico del desarrollo urbano y ordenamiento territorial vigente en el contexto del área de estudio, donde las reglas de transición del uso de suelo se determinan con base en una comparativa de la estructura física espacial existente; para ello, se tomaron en cuenta autores clásicos de la dinámica urbana, con la finalidad de identificar los criterios que determinaron para comprender los procesos territoriales y con ello definir las variables que construyen el espacio urbanizado desde el punto de vista físico, así mismo, desde la parte urbanística, se buscó la opinión de expertos relacionados con la operación urbana que coadyuvan en la definición de elementos que intervienen en el cambio del uso del suelo urbano (FIG. 1), en este sentido, tanto las representaciones matemáticas y los paquetes informáticos de última generación, que constituyen los modelos de simulación de los procesos territoriales, se consolidan bajo la interacción de variables espaciales tangibles.

Es por ello que tanto las abstracciones de los autores principales como contemporáneos convergen en elementos tácitos vinculantes en el campo de estudio de los cambios de uso de suelo, así como en la búsqueda de patrones o tendencias en los mismos, ayudando a la representación espacial de escenarios futuros. En modelos recientes como los de NIETO & OVIEDO & NACIF (2016), MAS & PÉREZ & CLARKE (2012), PLATA & GÓMEZ & BOSQUE (2010), AGUILERA & al. (2009), LIGMANN & CHURCH & JANKOWSKI (2008) y WHITE & ENGELEN (2000), donde para estimar los cambios de uso de suelo aplican dinámica de sistemas, criterios multiobjetivo

y redes neuronales artificiales, en su diseño también toman como base a los autores clásicos que se mencionan en la tabla.

Dado lo expuesto, el diseño del modelo de simulación se conformó de acuerdo a lo mostrado en la FIG. 2, donde se expresa lo siguiente:

- Identificar la dinámica de distribución y transición del uso de suelo urbano.
- Identificar patrones en el cambio de uso de suelo urbano a partir de procesos aleatorios y límites de la geometría espacial.
- Inferir las diversas transiciones espaciales a partir de eventos discretos.
- Modelar las variables que participan en la conformación del uso de suelo urbano y su expresión temporal y espacial.
- Predecir el crecimiento y la distribución del uso de suelo urbano.

#### 4.1. Área de estudio

El área de estudio se localiza en la Zona ZMP perteneciente al estado de Hidalgo, la cual contempla los municipios de Pachuca de Soto, Mineral de la Reforma, San Agustín Tlaxiaca, Zempoala y Zapotlán. La ZMP ha venido experimentando un intenso proceso de urbanización, asociado no solo al crecimiento natural, sino a

	Tenencia de la Tierra	Precio del Suelo	Aptitud Territorial	Densidad de Población	Distancia Centro Urbano	Distancia calle principal	Disponibilidad de infraestructura	Disponibilidad de transporte	Pendiente
Von Thünen (1826)		X			X			X	
Burgess (1925)		X		X	X			X	
Hoyt (1939)		X		X	X			X	
Christaller (1966)		X	X	X	X	X	X	X	
Harris & Ullman (1945)		X	X	X	X	X	X	X	
Weber (1929)			X	X	X	X		X	
Bazant (1984)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Opinión de expertos	X	X	X	X	X	X	X	X	X

FIG. 1/ Consideraciones en la conformación del Uso de Suelo

Fuente: Elaboración propia

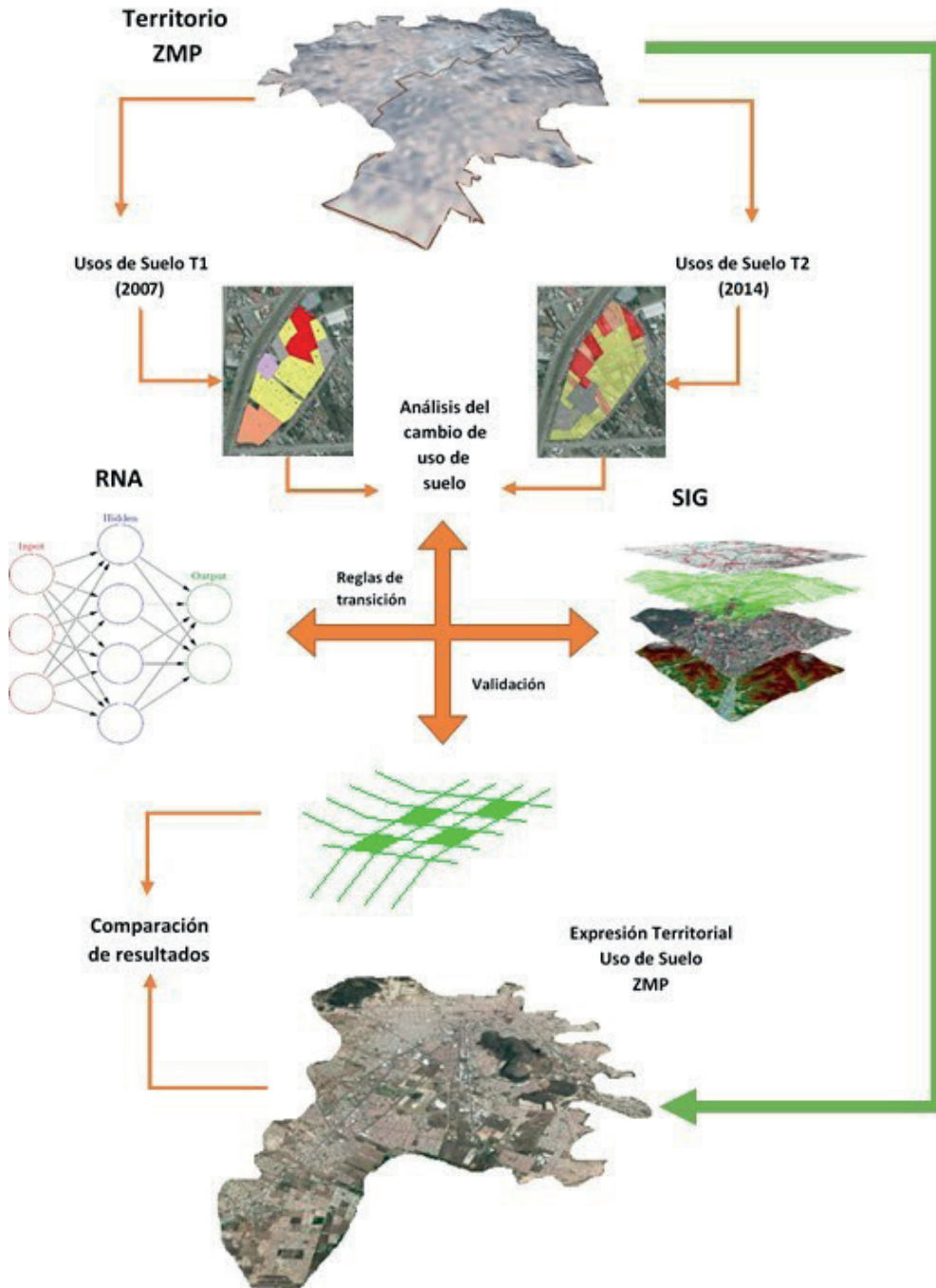


FIG. 2/ Esquema del modelo

Fuente: Elaboración propia



la creciente migración de personas residentes en la ciudad de México, quienes adquieren un lote o una vivienda, tanto para habitarla en forma permanente, usarla en forma ocasional o simplemente como patrimonio.

El uso de suelo de la ZMP está distribuido en habitacional, mixto, comercial y de servicios, predios baldíos y en menor porcentaje industrial. La zona habitacional tiene un eje rector primario denominado avenida Luis Donaldo Colosio, donde el tejido urbano se complementa con vialidades secundarias perpendiculares al eje descrito. El lugar se caracteriza por una dinámica en el cambio gradual del uso de suelo, derivado de la presión que ejerce su ubicación, al ser un tramo vial primario para el enlace con el Corredor de la Montaña (Zona turística) y como tal se presentan flujos vehiculares importantes de largo itinerario o de paso, que conlleva a una disposición de establecimientos dedicados a la prestación de servicios relacionados con el transporte y el comercio, llevando a una reconversión gradual de la imagen urbana expresada en los frentes de los lotes colindantes con esa vialidad, privilegiando las actividades del sector terciario, desplazando el uso habitacional hacia el interior del área de estudio, donde los baldíos urbanos permiten la apropiación del espacio, creando nuevos espacios de aprovechamiento a través de subdivisiones o fraccionamiento de los predios.

#### 4.2. Integración de Información Geoespacial

El estudio del espacio urbano y concretamente del uso del suelo, obliga a revisar los procesos que involucran la apropiación del territorio, donde factores como los económicos, sociales, culturales, políticos, geográficos, entre otros, juegan un papel primordial de la estructura urbana. Es por ello que, a través del análisis espacial del comportamiento de esos factores en el espacio urbano, permite identificar patrones espaciales más claros y consistentes en la estructura de la ciudad.

Se recopiló datos alfanuméricos generados en el año 2007 que corresponden a zonas de los municipios de Pachuca de Soto y Mineral de la Reforma, del primero se recopiló 75,800 registros geoespaciales y del segundo 69,722, los que forman parte de la zona de estudio (Instituto Municipal de Investigación y Planeación, 2008).

Con esta información, se identificó una zona con diversidad de usos de suelo, donde los datos geoespaciales del año 2007 son superpuestos en una imagen satelital del año 2014 (Fig. 3), que evidencia una constante expansión de la mancha urbana, limitada por la presencia de elevaciones naturales ubicadas al norte. La zona identificada contiene diversos usos de suelo, mismos que se codificaron, conforme a la normativa del programa de desarrollo urbano vigente.

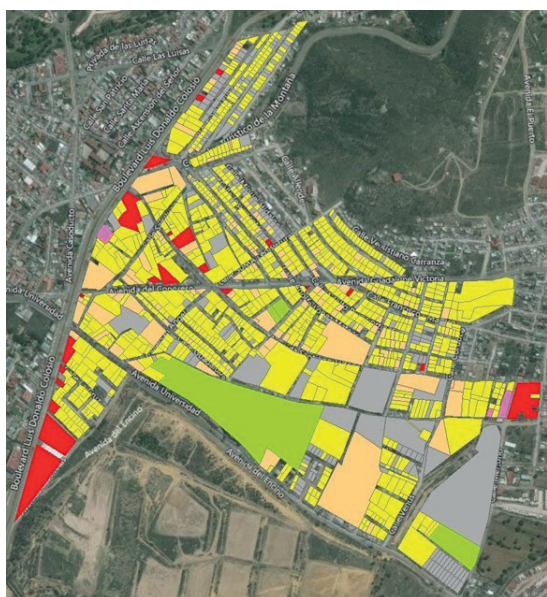


FIG. 3/ Sobreposición de datos espaciales del año 2007 de la Zona Metropolitana de Pachuca en imagen satelital del año 2014 y codificación de uso del suelo

Uso de Suelo	Clase	Codificación
<b>Comercio y Servicios</b>	1	[Red]
<b>Industria</b>	2	[Purple]
<b>Mixto</b>	3	[Green]
<b>Habitacional</b>	4	[Yellow]
<b>Equipamiento</b>	5	[Orange]
<b>Asentamientos Irregulares</b>	6	[Grey]

Fuente: Elaboración propia en base al Instituto Municipal de Investigación y Planeación (2008) y Secretaría de Obras Públicas y Ordenamiento Territorial (2015)

X1	Tenencia de la Tierra - Codificado (E,P,Pu) = (1,2,3)	Ejidal	E = 1
		Privada	p = 2
		Pública	Pu = 3
X2	Precio del Suelo - Codificado (pr1,pr2,pr3,pr4)	\$ 0 - 1 000m <sup>2</sup>	pr1 = (0 - 3 000)
		\$ 3 001 - 8 000m <sup>2</sup>	pr2 = (3 001 - 8 000)
		\$ 8 001 - 15 000m <sup>2</sup>	pr3 = (8 001- 15 000)
X3	Aptitud Territorial - Codificado (A,M,Na) = (1,2,3)	Apto	A = 1
		Medianamente Apto	M = 2
		No Apto	Na = 3
X4	Densidad de Población (hab/ha) -Codificado (dn1,dn2,dn3)	0 a 100	dn1 = (0 - 100)
		101 a 250	dn2 = (101 - 250)
		250 a 300	dn3 = (251 - 300)
X5	Distancia al centro de la ciudad	hasta 1 000m	du1= (0 - 1 000)
		de 1 001 a 3 000 m	du2 = (1 001 - 3 000)
		de 3 001 a 5 000 m	du3 = (3 001 - 5 000)
X6	Distancia a una calle principal	0-300m	i1 = (0 - 300)
		301 - 1 000m	i2 = (301 - 1 000)
		1 001 - 5 000 m	i3 = (1 001 - 5 000)
X7	Infraestructura - Codificado (i1,i2,i3)	0 - 300m	i1 = (0 - 300)
		301 - 1 000m	i2 = (301 - 1 000)
		1 001 - 3 000m	i3 = (1 001 - 3 000)
X8	Transporte - Codificado (t1,t2,t3)	0 - 150m	t1 = (0 - 150)
		151 - 300m	t2 = (151 - 300)
		301 - 500m	t3 = (301 - 500)
X9	Pendiente	0 - 5 (apto)	
		0 - 15 (medianamente apto)	
		mas de 15 (no apto)	

FIG. 4/ Caracterización de las variables que conforman el uso de suelo

Fuente: Elaboración propia

VARIABLES A CONSIDERAR			Comercio y servicios			Industria			Mixto			Habitacional			Equipamiento			Asentamientos irregulares			
			Mayor	Medio	Bajo	Mayor	Medio	Bajo	Mayor	Medio	Bajo	Mayor	Medio	Bajo	Mayor	Medio	Bajo	Mayor	Medio	Bajo	
X1	Tenencia de la tierra Codificado (E, P, Pu)	Ejidal E=1																			
		Privada P=2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2								2
		Pública Pu=3																			
X2	Precio del suelo Codificado (pr1, pr2, pr3)	0-3000m2 pr1=0-3000			2000			3000			2000			1500			3000	2000	1000	500	
		3001-8000m2 pr2=3011-8000		5000			6000		8000	4000		7000	3500			6000					
		8001-15000m2 pr3=8001-15000	10000				11000								9000						
X3	Aptitud territorial Codificado (A, M, Na)	Apto A=1			1												1			1	
		Medianamente apto A=2	2	2		2	2	2	2	2	2	2	2		2				2		
		No apto NA=3													3			3			
X4	Densidad poblacional (hab/ha) Codificado (dn1, dn2, dn3)	0 a 100 dn1=0-100			50	50	50	50			50			100			100			100	
		101 a 250 dn2=101-250		150							200			200			200			150	
		250 a 300 dn3=251-300	300							300					300			300			
X5	Distancia al centro de la ciudad (du1, du2, du3)	hasta 1000 m du1=0-1000																			
		1001 a 3000m du2=1001-3000		3000	2500		3000	2500		2000	1500		2500	2000		3000	2500		2500	1500	
		3001 a 5000m du3=3001-5000	3750				3700			3800			4000			4000			3700		
X6	Distancia a una calle principal (dp1, dp2, dp3)	0-300m dp1=0-300			5			5		300	5		300			5				300	
		301-1000m dp2=301-1000		500			500		700				1000			600			1000		
		1001-5000m dp3. 1001-5000	1200				1187						1500			1200			2000		
X7	Infraestructura Codificado (i1, i2, i3)	0-300m i1=0-300	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5		300	
		301-1000m i2=301-1000																			800
		1001-3000m i3=1001-3000																		2000	
X8	Transporte Codificado (t1, t2, t3)	0-150m t1=0-150			30			30			5					5					
		151-300m t2=151-300		250			250			300			100	300		1000			1000	300	
		301-500m t3=301-500	500			600			700			1500			1300			2000			
X9	Pendiente	0-5 apto			4			4	4	4	4	5	5	5	4		4			5	
		0-15 medianamente apto	10	7		10	7								7				10		
		mas de 15 no apto																15			

FIG. 5/ Sistematización de los datos de uso de suelo

Fuente: Elaboración propia

Con los usos de suelo definidos, se categorizaron las variables que participan en su conformación. Cada variable fue ponderada de acuerdo con la información disponible (mismas que son el resultado de la revisión de los modelos de estructura urbana y la opinión de expertos), generando rangos de valores por cada variable de acuerdo con los valores mínimos y máximos identificados (FIG. 4).

Con los Usos de Suelo (clases) y las variables identificadas, se generó una matriz de  $9 \times 6$  con valores asignados, indicando que para cada clase existe una combinación de variables en su definición, misma que explican su expresión en el territorio y su vinculación con otras clases ya sea próximas o contiguas, obteniendo lo que se muestra en la FIG. 5.

Con los rangos establecidos, los valores al interior resultaron bastante amplios por lo que fue necesario generar fronteras con mayores datos, que ayudaron a identificar un patrón con la mayor información posible, y que fueron los valores de entrada al utilizar las RNA. Para ello se generó un algoritmo denominado Matriz General que permitió identificar valores próximos a las fronteras establecidas para cada variable por cada clase del tipo:

La matriz resultante fue de  $10 \times 24,300$ . Para la clase 1 se encontraron 1,458 columnas, de la

$$c_{1-6} = f(x_{1-9})$$

misma forma, se replicó para cada clase, hasta llegar a 24,300 columnas. Con la matriz conformada, se procedió a diseñar la red neuronal artificial, utilizando el paquete informático Matlab, para ello, la red es entrenada para que realice un determinado tipo de procesamiento, en este proceso de aprendizaje, el conjunto de pesos sinápticos aleatorios permitió identificar los datos requeridos para que la red pueda realizar su labor, a través de un ejercicio iterativo de refinamiento.

Mediante el algoritmo de aprendizaje *backpropagation* se entrenó la RNA presentando unas entradas y salidas conocidas, a través de los valores obtenidos de la matriz resultante, donde este algoritmo de entrenamiento y su parámetro de convergencia es el error cuadrático. El error cuadrático indica si la RNA ha sido capaz de aprender los datos de entrenamiento, cuanto más pequeño es, se tiende a un aprendizaje adecuado (FIG. 6).

Para la identificación de la RNA adecuada, se sometieron a ciclos de prueba y error, asignando

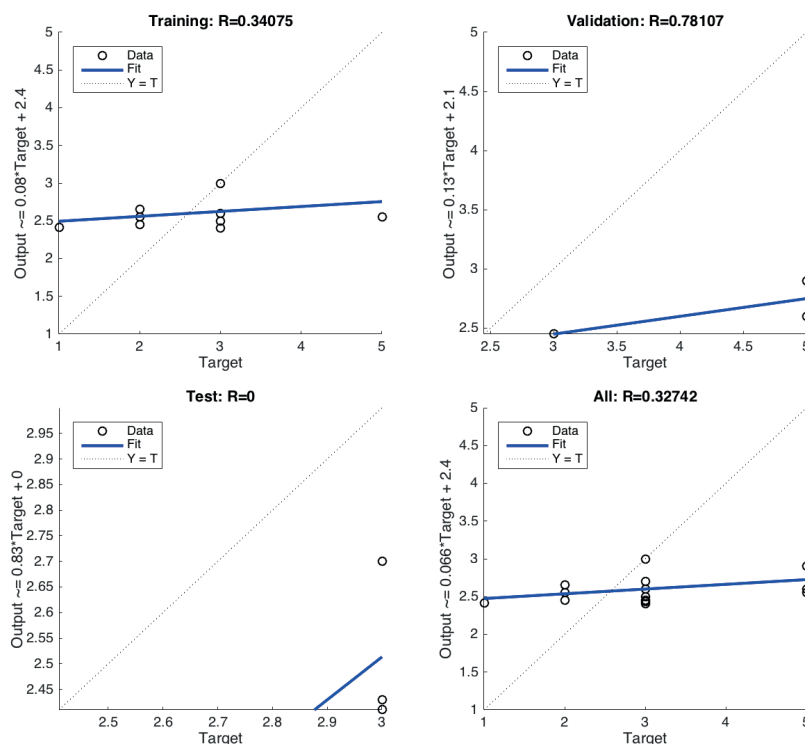


FIG. 6/ Coeficiente de correlación obtenido de la RNA resultante

Fuente: Elaboración propia con base a Matlab versión R2014a

aleatoriamente número de neuronas y capas, comparando los errores cuadráticos y los coeficientes de correlación (r). Por las cantidades de iteraciones y datos generados, se diseñó un algoritmo que permitió identificar el mínimo error cuadrático de las diversas combinaciones aleatorias realizadas.

La arquitectura final de la red neuronal que dio mejor resultado, después de probar varios algoritmos de entrenamiento y diferentes números de capas, quedó conformada por 9 neuronas en la capa de entrada, 10 neuronas en la primera capa oculta, 10 neuronas en la segunda capa oculta, 9 neuronas en la tercer capa oculta y 1 neurona en la capa de salida. Cada una de estas capas contiene una función de activación lineal.

La RNA obtenida identifica los usos de suelo en la zona definida para el año 2007, donde la siguiente asignación es que la misma RNA sea capaz de predecir el comportamiento del uso de suelo en el año 2014 (FIG. 7), con la información tabular y geoespacial que permita realizar esa tarea, además de poder realizar los comparativos correspondientes.

Para el análisis de los cambios de uso del suelo en un periodo de 7 años, se utilizó una matriz de tabulación cruzada, basada en la metodología desarrollada por PONTIUS & SHUSAS & McEACHERN (2004). Como resultado de los datos tabulares geoespaciales de los dos periodos identificados, se establecen los valores del periodo próximo anterior y se ordenan de tal manera que permitan inferir los datos individuales por clase y variable para el año 2014.

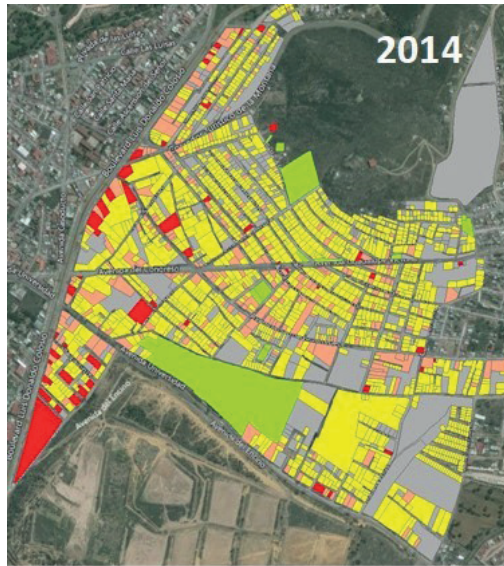


FIG. 7/ Datos espaciales año 2014, Zona Metropolitana de Pachuca

Fuente: Elaboración propia

En la matriz presentada en la FIG. 8, las filas representan las variables del mapa en el tiempo T-1 y las columnas las clases del mapa en el tiempo T-2. Asimismo, cada valor de la variable X1...Xn, es relacionado con el T-1, ubicándose en el lugar de la clase y así sucesivamente, posteriormente la relación es inversa al utilizar los valores de las variables del T-2, con este proceso se proyectan los valores para el T-2.

Primer momento	Clase 1 <sub>T-1</sub>		Clase 2 <sub>T-1</sub>		Clase 3 <sub>T-1</sub>		Clase 4 <sub>T-1</sub>		Clase 5 <sub>T-1</sub>	
Segundo momento	Clase 1 <sub>T-2</sub>		Clase 2 <sub>T-2</sub>		Clase 3 <sub>T-2</sub>		Clase 4 <sub>T-2</sub>		Clase 5 <sub>T-2</sub>	
Variable 1	x1-1 <sub>t-1</sub>	x1-1 <sub>t-2</sub>	x1-2 <sub>t-1</sub>	x1-2 <sub>t-2</sub>	x1-3 <sub>t-1</sub>	x1-3 <sub>t-2</sub>	X1-4 <sub>t-1</sub>	X4-4 <sub>t-2</sub>	x1-5 <sub>t-1</sub>	x1-5 <sub>t-2</sub>
Variable 2	X2-1 <sub>t-1</sub>	X2-1 <sub>t-2</sub>	X2-2 <sub>t-1</sub>	X2-2 <sub>t-2</sub>	X2-3 <sub>t-1</sub>	X2-3 <sub>t-2</sub>	X2-4 <sub>t-1</sub>	X2-4 <sub>t-2</sub>	X2-5 <sub>t-1</sub>	X2-5 <sub>t-2</sub>
Variable 3	X3-1 <sub>t-1</sub>	X3-1 <sub>t-2</sub>	X3-2 <sub>t-1</sub>	X3-2 <sub>t-2</sub>	X3-3 <sub>t-1</sub>	X3-3 <sub>t-2</sub>	X3-4 <sub>t-1</sub>	X3-4 <sub>t-2</sub>	X3-5 <sub>t-1</sub>	X3-5 <sub>t-2</sub>
Variable 4	X4-1 <sub>t-1</sub>	X4-1 <sub>t-2</sub>	X4-2 <sub>t-1</sub>	X4-2 <sub>t-2</sub>	X4-3 <sub>t-1</sub>	X4-3 <sub>t-2</sub>	X4-4 <sub>t-1</sub>	X4-4 <sub>t-2</sub>	X4-5 <sub>t-1</sub>	X4-5 <sub>t-2</sub>
Variable 5	X5-1 <sub>t-1</sub>	X5-1 <sub>t-2</sub>	X5-2 <sub>t-1</sub>	X5-2 <sub>t-2</sub>	X5-3 <sub>t-1</sub>	X5-3 <sub>t-2</sub>	X5-4 <sub>t-1</sub>	X5-4 <sub>t-2</sub>	X5-5 <sub>t-1</sub>	X5-5 <sub>t-2</sub>
Variable 6	X6-1 <sub>t-1</sub>	X6-1 <sub>t-2</sub>	X6-2 <sub>t-1</sub>	X6-2 <sub>t-2</sub>	X6-3 <sub>t-1</sub>	X6-3 <sub>t-2</sub>	X6-4 <sub>t-1</sub>	X6-4 <sub>t-2</sub>	X6-5 <sub>t-1</sub>	X6-5 <sub>t-2</sub>
Variable 7	X7-1 <sub>t-1</sub>	X7-1 <sub>t-2</sub>	X7-2 <sub>t-1</sub>	X7-2 <sub>t-2</sub>	X7-3 <sub>t-1</sub>	X7-3 <sub>t-2</sub>	X7-4 <sub>t-1</sub>	X7-4 <sub>t-2</sub>	X7-5 <sub>t-1</sub>	X7-5 <sub>t-2</sub>
Variable 8	X8-1 <sub>t-1</sub>	X8-1 <sub>t-2</sub>	X8-2 <sub>t-1</sub>	X8-2 <sub>t-2</sub>	X8-3 <sub>t-1</sub>	X8-3 <sub>t-2</sub>	X8-4 <sub>t-1</sub>	X8-4 <sub>t-2</sub>	X8-5 <sub>t-1</sub>	X8-5 <sub>t-2</sub>
Variable 9	X9-1 <sub>t-1</sub>	X9-1 <sub>t-2</sub>	X9-2 <sub>t-1</sub>	X9-2 <sub>t-2</sub>	X9-3 <sub>t-1</sub>	X9-3 <sub>t-2</sub>	X9-4 <sub>t-1</sub>	X9-4 <sub>t-2</sub>	X9-5 <sub>t-1</sub>	X9-5 <sub>t-2</sub>
Valores proyectados <sub>p-2</sub>	Clase 1 <sub>p-2</sub>		Clase 2 <sub>p-2</sub>		Clase 3 <sub>p-2</sub>		Clase 4 <sub>p-2</sub>		Clase 5 <sub>p-2</sub>	

FIG. 8/ Matriz de tabulación cruzada para dos mapas de diferente fecha

Fuente: Elaboración propia

### 4.3. Validación del modelo

Para validar el modelo se tomó como referencia la zona (con manzanas a nivel de lote) mostrada en la FIG. 9, donde la sobreposición cartográfica de los datos alfanuméricos geoespaciales identificados para el año 2007 y 2014 muestra una zona diferenciada por la gama de usos de suelo y la verificación de su transición en el tiempo. Se identifica que en el T-1 se componía de 19 lotes y para el T-2 surgieron 7 lotes más, producto de subdivisiones de diversos predios, resultando 26 lotes para el T-2.

Con la representación espacial de la matriz de tabulación cruzada y los valores identificados para cada variable y clase se conformó una matriz de 98x26, con la cual se realizaron las iteraciones para identificar los valores en el T-1 y en el T-2.

Se proyectaron los valores para cada variable en el T-2 ajustando el algoritmo de las RNA, para las variables que van de X1 a X9. Los datos generados, con base en Matlab, denominados adecuados, resultado de las diversas corridas y que son diferenciadas por el error cuadrático, quedaron identificados de acuerdo

con los siguientes pares de (Variable, Corrida): (X1,1), (X2, 64), (X3,1), (X4,1), (X5,87), (X6,98), (X7,1), (X8,121), y (X9,1).

Con estos valores, se conformó una matriz resultante de 26 x 10, misma que se tabula y se expresa espacialmente, por lo que la correlación de los datos de salida son el resultado de la iteración que hacen todas las clases y los elementos que iteran en la red neuronal, que como base tienen las 9 variables que se establecen en la misma red, obteniendo como resultado un escenario con correspondencia al 55%, tomando en consideración un rango de valores con 5% de error. Si se aumenta la amplitud a 15% en la recolección de datos, la correspondencia se eleva a un 80%. Con la amplitud de datos al 35%, la correspondencia incrementa significativamente, a 95%, emulando el comportamiento con una adecuada aproximación del fenómeno de transición del uso de suelo. Lo anterior se muestra en la FIG. 10.

La representación gráfica del comportamiento de las variables en el territorio sugiere una transición al uso de suelo de comercio y servicios, correlativo a la disponibilidad de infraestructura

## 2007



## 2014



FIG. 9/ Comparativa de los datos alfanuméricos geoespaciales identificados para el año 2007 y el año 2014

Fuente: Elaboración propia

**1ra. aproximación**  
**Correspondencia al 55%**



**2da. aproximación**  
**Correspondencia al 80%**



**3ra. aproximación**  
**Correspondencia al 95%**



FIG. 10/ **Valores Proyectados de T-2 – TP-2**

Fuente: Elaboración propia con base en Matlab versión R2014a y ArcGis 10.1

y a su ubicación, al ser un punto de enlace y vínculo con la zona norte (turística) del estado de Hidalgo. Se tiene que la derrama económica, derivada del flujo vehicular y peatonal en el entorno, inciden en la velocidad de ocupación horizontal y vertical de las edificaciones. El conjunto de variables simuladas, muestran que los datos son confiables y el modelo es capaz de representar el comportamiento del uso de suelo en el tiempo y espacio.

## 5. Conclusiones

Como método de predicción del comportamiento del uso de suelo, la RNA presenta una eficiencia que alcanza una buena precisión, sin embargo, la integración de los datos requiere un trabajo de campo y gabinete significativo, ya que la disposición de fuentes validas es limitada.

Se establece la posibilidad del uso de información geoespacial a nivel de lote, previo tratamiento de los datos, para la modelación de la transición del uso de suelo, utilizando redes neuronales artificiales, de esta forma se sientan las bases para un manejo operativo.

Con la elección de variables que condicionan determinado uso de suelo, el grado de ajuste obtenido en cuanto a la calidad predictiva del modelo ha sido alto, sin embargo, es preciso incorporar variables cualitativas (política, social,

cultura, entre otras) más allá de los modelos económicos de ocupación del territorio.

Un punto crítico es el proceso de refinamiento y categorización de las variables de entrada seleccionadas, lo cual permite una representación fehaciente del comportamiento del uso de suelo en el tiempo y en el espacio.

Por la capacidad de las RNA es posible introducir una gran cantidad de datos de entrada, donde una vez entrenada la red, los datos son procesados de una manera ágil y con una precisión adecuada; sin embargo, con el aumento en el número de variables en la modelación de los fenómenos urbanos, se requiere de más información para que el modelo pueda correlacionar adecuadamente los valores de las variables de entrada con la salida, implicando un esfuerzo particular al momento de la caracterización de los datos.

Se corrobora la eficiencia de las RNA para la diversidad que representa la modelación dinámica del uso del suelo pero de la misma forma las particularidades de cada asentamiento humano reflejados en los datos, limitan la generalización de un método produciendo sesgos, así mismo, se detecta un comportamiento diferente al hablar de zonas urbanas consolidadas, en transición y de futura ocupación.

El modelo de simulación espacial basado en RNA en el campo del estudio de procesos y dinámicas urbanas, constituye una herramienta capaz de complementar la configuración de escenarios futuros y coadyuvar en el proceso de

toma de decisiones para la localización de usos de suelo en la planeación territorial. Utilizando algoritmos de aprendizaje, la red neuronal es capaz de reproducir un comportamiento aprendido, incluso de pronosticar resultados de estados que no se tenían, con grados de precisión aceptables. Sin embargo, para que se obtengan resultados aceptables, se deben identificar las variables adecuadas para el modelo y contar con registros suficientes para lograr un entrenamiento satisfactorio.

## 6. Bibliografía

- AGUILERA, A. (1999): Ciudades fractales y telarañas urbanas. *Vetas*, 2, 49-59. <https://revista.colsan.edu.mx/index.php/COLSAN/article/view/1164/886>
- AGUILERA, F. & PLATA, W. & BOSQUE, J. & GÓMEZ, M. (2009): Diseño y simulación de escenarios de demanda de suelo urbano en ámbitos metropolitanos. *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, 4, 57-190. <https://core.ac.uk/download/pdf/41784904.pdf>
- ALATORRE, L.C. & TORRES, M.E. & ROJAS, H.A. & BRAVO, L.C. & WIEBE, L.C. & SANDOVAL, F. & LÓPEZ, E. (Coords.) (2015): *Geoinformática aplicada a los procesos geoambientales*. Ciudad Juárez, Chihuahua, México, Universidad Autónoma Ciudad Juárez. <https://elibros.uacj.mx/omp/index.php/publicaciones/catalog/view/55/50/154-1>
- BARREIRA GONZÁLEZ, P. & GÓMEZ DELGADO, M. & AGUILERA BENAVENTE, F. (2015): Simulación del crecimiento urbano y modelos basados en autómatas celulares: el uso de parcelas catastrales vectoriales a partir de la teoría de grafos. En J. DE LA RIVA & P. IBARRA & R. MONTORIO & M. RODRIGUES (Eds.), *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación* (pp. 511-520), Universidad de Zaragoza-AGE. [http://congresoage.unizar.es/eBook/trabajos/054\\_Barreira%20Gonzalez.pdf](http://congresoage.unizar.es/eBook/trabajos/054_Barreira%20Gonzalez.pdf)
- BAZANT, J. (1984): *Manual de Criterios de Diseño Urbano* (2ª ed.), México, Editorial Trillas. <https://urbanismodos.files.wordpress.com/2014/07/manual-de-criterios-de-disec3b1o-urbano-jan-bazant-s.pdf>
- BURGESS, E. W. (1925): The growth of city: an introduction to a research project. En R.E. PARK & E.W. BURGESS & R.D. MCKENZIE, *The city*, Chicago, The University of Chicago Press.
- CARR, M.H. & ZWICK, P.D. (2007): *Smart Land-Use Analysis – The LUCIS Model*. Redlands, California, ESRI Press.
- CASTILLO, E.E. (2005): *Integración del uso de suelo a las zonas adyacentes al centro de población*. San Nicolás de los Garza, N.L., México, Universidad Autónoma de Nuevo León. <http://eprints.uanl.mx/1630/1/1020150612.PDF>
- CHRISTALLER, W. (1966): *Central Places in Southern Germany*, Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall.
- DILLON, B. & COSSIO, B. & POMBO, D. (2010): Valor del suelo urbano en una ciudad intermedia: la volatilidad del capital y sus resultados efímeros. *Scripta Nova*. *Revista electrónica de geografía y ciencias sociales*, 14(331), 34.
- FERNÁNDEZ, M. B. (2019): La clasificación urbanística del espacio de transición urbano / rural en la legislación del suelo del Ecuador. *EIDOS*, 14, 3-19.
- GIS AND CHIPS (28 de 05 de 2013): *Gis and Chips*. <http://www.gisandchips.org/2013/05/28/prediccion-del-crecimiento-de-nucleos-urbanos-mediante-automas-celulares/>
- GÓMEZ, L. F. (2020): Simulación de escenarios futuros de cambios de usos del suelo usando Redes Neuronales Artificiales. Aplicación en la ciudad de Curuzú Cuatiá, Corrientes, Argentina. *Estudios Socioterritoriales. Revista de Geografía*, (28), 054-054.
- GÓMEZ, M. & RODRÍGUEZ, V. (2012): *Análisis de la Dinámica Urbana y simulación de escenarios de Desarrollo Futuro con Tecnologías de la Información Geográfica*, Madrid, Ra-Ma.
- HARRIS, C.D. & ULLMAN, E.L. (1945): The nature of cities. *Annals of the American Academy of Political and Social Sciences*, 242, 7-17.
- HENRÍQUEZ, C. & AZÓCAR, G. (2007): Propuesta de Modelos Predictivos en la Planeación Territorial y Evaluación de Impacto Ambiental. En *IX Coloquio Internacional de Geocrítica*, Porto Alegre. <http://www.ub.edu/geocrit/9porto/cristian.htm>
- HOYT, H. (1939): *The structure and growth of residential neighborhoods in American cities*, Washington, D.C., Federal Housing Administration.
- HUMACATA, L. (2019): Análisis espacial de los cambios de usos de suelo. Aplicación con Sistemas de Información Geográfica. *Revista Cartográfica*, 98, 239-257.
- Instituto Municipal de Investigación y Planeación, IMIP (2008): *Programa Municipal de Desarrollo Urbano de Pachuca de Soto, Estado de Hidalgo*. Gobierno del Estado de Hidalgo.
- LIGMANN, A. & CHURCH, R. L. & JANKOWSKI, P. (2008): Spatial optimization as a generative technique for sustainable multiobjective land-use allocation. *International Journal of Geographical Information Science*, 22 (6), 601-622.
- LÓPEZ, P. (21 de febrero de 2014): *Diferencia entre suelo urbano consolidado y suelo urbano no consolidado*. <http://lopezabogados.org/web/diferencia-entre-suelo-urbano-consolidado-y-suelo-urbano-no-consolidado/>
- MAANTAY, J. & ZIEGLER, J. (2006): *Gis for Urban Environment*, California, Redlands, ESRI Press.
- MAS, J.F. & PEREZ-VEGA, A. & CLARKE, K.C. (2012): Assessing simulated land use/cover maps using similarity and fragmentation indices. *Ecological Complexity*, 11, 38-45.
- MATURANA, F. & PEÑA-CORTÉS, F. & MORALES, M. & VIELMA-LÓPEZ, C. (2021): Crecimiento urbano difuso en ciudades intermedias. Simulando el proceso de expansión en la ciudad de Temuco, Chile. *Urbano*, 24(43), 62-73.
- MENDOZA, M.I. & ALCIBAR, C. (2020): La zonificación territorial como instrumento de planificación y gestión de destinos turísticos afectados por desastres naturales: la estrategia posterremoto de 2016 en Portoviejo (Ecuador). *Revista Internacional de Turismo, Empresa y Territorio*, 4(1), 1-21.

- MINISTERIO DE PLANEACIÓN Y COOPERACIÓN (2003): *Análisis, Políticas de Usos de Suelo*, Santiago de Chile, Ministerio de Planeación y Cooperación (MIDEPLAN).
- MOLINER, F. (30 de Junio de 2005): *Ciudades para el futuro más sostenible*. Notas para entender el mercado inmobiliario. <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n29/afam.html>
- NIETO, P. & OVIEDO, S. & NACIF, N. (2016): Un modelo de análisis de uso del suelo en diferentes escenarios en San Juan, Argentina. *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo*, 9(17), 90-101. [HTTPS://REVISTAS.JAVERIANA.EDU.CO/INDEX.PHP/CVYU/ARTICLE/VIEW/16845/13640](https://REVISTAS.JAVERIANA.EDU.CO/INDEX.PHP/CVYU/ARTICLE/VIEW/16845/13640)
- PLATA, W. & GÓMEZ, M. & BOSQUE, J. (2010): Desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimo para la Comunidad de Madrid aplicando métodos de Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica. *GeoFocus, Revista internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 10, 103-134.
- PONTIUS, R.G. JR. & SHUSAS, E. & MCECHERN, M. (2004): Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 101, 251-268.
- QUINTANA, J. & OJEDA, A. & GARCÍA, J. (2018): Factores que explican el valor del suelo. Caso Hermosillo, Sonora, México. *Contexto, Revista de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Nuevo León*, 12(16), 93-108.
- SANTOS, M. (2000): *La naturaleza del espacio*, Barcelona, Ariel.
- Secretaría de Obras Públicas y Ordenamiento Territorial, SOPOT (Julio de 2015): Sistema Estatal de Desarrollo Urbano y Ordenamiento Territorial. *Programa de Desarrollo Urbano y Ordenamiento Territorial de la Zona Metropolitana de Pachuca*. Pachuca, Hidalgo, México, SOPOT.
- SERRA DEL POZO, P. (1996): Análisis espacial y modelos urbanos en un entorno SIG. *Ciudad y Territorio Estudios Territoriales*, (110), 785-799. <https://recyt.fecyt.es/index.php/CyTET/article/view/84350>
- SOLÁ, M. & RUBIO, M. (1972): De los modelos de simulación automática de procesos urbanos: Sobre el sentido teórico-práctico. *Ciudad y Territorio Estudios Territoriales*, (11), 12-18. <https://recyt.fecyt.es/index.php/CyTET/article/view/80328>
- SONAGLIO, K. E. & SILVA, L. (2009): Zonificación, ocupación y uso de suelo por medio del SIG. *Estudios y perspectivas en turismo*, 18(4), 381-399.
- SUÁREZ, M. & DELGADO, J. (2010): Patrones de movilidad residencial en la Ciudad de México como evidencia de co-localización de población y empleos. *EURE*, 36(107), 67-91.
- VON THÜNEN, J.H. (1826): *Der Isolierte Staat in Beziehung auf Landschaft und Nationalökonomie*, Hamburg. English translation: WARTENBERG, C.M. (1966): *Von Thünen's Isolated State*, Pergamon Press Oxford.
- WADDELL, P. (2002): Modeling Urban Development for Land Use, Transportation, and environmental Planning. *Journal of American Planning Association*, 68 (3), 297-314.
- WEBER, A. (1929): *Theory of the Location of Industries*, Chicago, University of Chicago Press.
- WHITE, R. & ENGELN, G. (2000): High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems, *Computers, Environment and Urban Systems*, 24, 383-400.

## 7. Listado de Acrónimos/Siglas

RNA	Redes Neuronales Artificiales
SIG	Sistemas de Información Geográfica
ZMP	Zona Metropolitana de Pachuca