



Universidad Nacional Autónoma de México
Programa de Maestría y Doctorado en Urbanismo

Modelado y simulación de sistemas urbanos
complejos basado en autómatas celulares

Caso de estudio: Los cambios de usos del suelo y
crecimiento urbano en el pueblo de Ajusco

T E S I S

Que para obtener el grado de:
Maestro en Urbanismo

P r e s e n t a :
Gustavo Camacho Palacios

D i r e c t o r d e T e s i s
Dr. Rafael Valdivia López



México D.F., 2012



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Programa de Maestría y Doctorado en Urbanismo

Modelado y simulación de sistemas urbanos complejos basado en autómatas celulares

Caso de estudio: Los cambios de usos del suelo y crecimiento urbano en el pueblo de Ajusco

T E S I S

Que para obtener el grado de:
Maestro en Urbanismo

P r e s e n t a :
Gustavo Camacho Palacios

D i r e c t o r d e T e s i s
Dr. Rafael Valdivia López

México D.F., 2012

Campo de conocimiento
Desarrollo Urbano y Regional

D I R E C T O R
D E T E S I S

Dr. Rafael Valdivia López

S I N O D A L E S

Dra. María del Carmen Valverde Valverde

Dra. Angélica del Rocío Lozano Cuevas

Dr. Alejandro Rodríguez Valdés

Mtro. Luis Alejandro Guzmán Castro

A g r a d e c i m i e n t o s

Gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México, al programa de Maestría y Doctorado en Urbanismo y a la Dirección General de Estudio de Posgrado por el apoyo mostrado durante mis estudios de maestría.

Un agradecimiento especial al Dr. Rafael Valdivia por su tiempo, orientación, comentarios, sugerencias y por creer que se podía hacer este trabajo.

Agradezco a la Dra. Carmen Valverde, a la Dra. Angélica Lozano, al Dr. Alejandro Rodríguez y al Mtro. Alejandro Guzmán por su tiempo para leer éste trabajo y por sus comentarios y sugerencias que lo enriquecieron enormemente.

Éste trabajo lo dedico a mis padres Saray Pedro y a mis hermanos Cary, Luis, Lety y Orbey en especial a mi sobrina Fernanda.

Índice

1. Introducción	1
1.1 Problemática.....	3
1.2 Justificación	4
1.3 Objetivos	5
1.5.1 Objetivo general	5
1.5.2 Objetivos particulares	5
1.4 Hipótesis.....	6
1.6.1 Hipótesis general.....	6
1.6.2 Hipótesis particulares	6
1.5 Contenido y alcances	6
1.6 Procedimiento de la investigación.....	7
1.6.1 Delimitación espacial.....	8
1.6.2 Delimitación temporal	8
1.6.3 Fuentes de datos e indicadores.....	8
1.6.4 El modelado y simulación como herramienta para la planeación urbana.....	9
1.7 Límites del proyecto.....	10
2. Marco teórico	11
2.1. Sistemas complejos y sistemas urbanos	11
2.1.1. Introducción	11
2.1.2. Teoría de la complejidad	11
2.1.3. Sistemas emergentes	13
2.1.4. La complejidad de los sistemas sociales	14
2.1.5. El sistema urbano como sistema complejo	17
2.2. El empleo de autómatas celulares para el estudio de los sistemas urbanos.....	19
2.2.1. Los Autómatas Celulares (AC)	19
2.2.2. Los autómatas celulares en las ciencias sociales	23
2.2.3. Los autómatas celulares en los sistemas urbanos	24
2.3. Usos del suelo	31
2.3.1. Introducción.....	31
2.3.2. El suelo, usos del suelo y cambios de usos del suelo.....	31
2.3.4. Teoría Físico-Social, base de los modelos de los autómatas celulares aplicado a los cambio de usos del suelo	41
2.4. Modelos para el estudio de los cambios de usos del suelo basados en autómatas celulares.....	46
2.4.1. Introducción.....	46
2.4.2. Modelos de los cambios de usos de suelo basado en autómatas celulares	49
2.4.3. El modelo de los cambios de usos de suelo de Roger White basado en autómatas celulares	50
2.5 Conclusiones.....	55

3. Estudios análogos	56
3.1. Resumen	56
3.2. Modelado y simulación de los cambio de usos de suelo en la ciudad de Cincinnati, Ohio, utilizando el modelo de White	57
3.2.1. Antecedentes	57
3.2.2. Método de modelación	57
3.2.3. La simulación de Cincinnati	60
3.2.4. El análisis de sensibilidad	62
3.2.5. Resultados alcanzados	67
3.3. Modelado y simulación del crecimiento y densificación del Pueblo de San Miguel Topilejo, Tlalpan, D.F. utilizando un modelo evolutivo	68
3.3.1. Antecedentes	68
3.3.2. Método de modelación y simulación	69
3.3.3. La simulación de Topilejo	72
3.3.4. Resultados alcanzados	77
3.4. Conclusiones	80
4. Caso de estudio: Los cambios de usos del suelo y crecimiento urbano en el pueblo de Ajusco	81
4.1. Introducción	81
4.1.1. Pueblos originarios de la Ciudad de México	82
4.1.2. Antecedes históricos del pueblo de Ajusco	82
4.1.3. Localización	83
4.1.4. Aspectos físicos	84
4.1.5. Aspectos demográficos	85
4.1.6. Aspectos de niveles de marginación	95
4.1.7. Aspectos jurídicos-administrativos	96
4.2. Evolución de los cambios de usos del suelo	102
4.2.1. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 1970	103
4.2.2. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 1997	104
4.2.3. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 2000	105
4.2.4. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 2005	106
4.2.5. Comparación de los cambios de uso del suelo en los años 1970, 1997, 2000 y 2005 en el pueblo de Ajusco	107
4.3. Usos de suelo urbano, agrícola, forestal, pastizal, matorral y agroforestal en 2010 (actuales)	108
4.4. Modelado	112
4.4.1. Espacio celular	112
4.4.2. Conjunto de estados (usos del suelo: urbano, agrícola, forestal, pastizal, matorral, agroforestal y vial)	114
4.4.3. Vecindad (Moore: radio de 6 celdas)	114
4.4.4. Función de transición (White, 1996)	115
4.5. Simulación	116
4.5.1. Introducción	116
4.5.2. Simulación para el año 2010	121
4.5.3. Simulación para los años 2015 y 2020	124
4.6. Resultados	125
4.6.1. Comparación de datos del 2010: reales con la simulación	125
4.6.2. Crecimiento simulado 2010, 2015 y 2020	125

4.6.3.	Validación del modelo y la simulación	126
4.6.4.	Comprobación de las hipótesis	130
4.7.	Conclusiones	131
4.7.1.	Sobre la modelación y simulación en la zona de estudio	131
4.7.2.	Sobre la situación actual y la problemática de la zona de estudio.....	132
4.7.3.	Sobre el modelo de White.....	133
5.	Conclusiones generales y recomendaciones	134
	Bibliografía	137
	Anexos.....	140
A.1	NetLogo.....	140
A.1.1	Características.....	141
A.2	Implementación de la interfaz del modelo de White en NetLogo.....	144
A.3	Listado del programa del modelo de White en NetLogo.....	148
A.4.	Clasificación de las teorías de los de usos del suelo y su cambio (Briassoulis, 2000)	164
A.4.1.	Clasificación de las teorías del cambio de uso del suelo.....	164
A.5.	Clasificación de los modelos de los usos del suelo y su cambio (Briassoulis, 2000)	168
A.6.	Marco Jurídico: Usos del suelo a nivel Federal y el D.F.....	174
A.6.1	Nivel Federal	174
A.6.2	Nivel Estatal.....	177
A.6.2.1	Ley de Desarrollo Urbano del D.F. (15 de Julio 2010).....	177
A.6.3	Nivel Delegacional y local	181
A.6.3.1	Tlalpan: Programa Delegacional de Desarrollo Urbano 2010.....	181
A.7.	Raíz del error cuadrático medio - Root Mean Square Error - RMSE	187

1. Introducción

La ciudad la podemos entender y estudiar como un **conjunto de sistemas** o procesos dinámicos interconectados, teniendo una dinámica urbana, siendo así un **sistema complejo**.

La ciudad al ocupar un espacio físico y al ser un **sistema dinámico** implica que se suscitan cambios, hay una evolución, y por tanto una transformación de su entorno físico, a través diversos factores que pueden ser naturales, sociales, económicos y políticos o una combinación, que en muchos casos son a través de **proyectos urbano/arquitectónicos**, que requieren estudios previos para conocer cuáles serán los impactos y efectos que tendrán su implementación.

Por dinámica urbana se entiende al conjunto de procesos sociales, económicos y políticos que ocurren tanto simultáneamente como sucesivamente, dentro del espacio geográfico urbano. La dinámica urbana es creada por las múltiples interacciones entre las personas (actores) y las organizaciones públicas y privadas que coexisten en una misma ciudad.

Un actor urbano es un individuo o conjunto de individuos que actúan en una esfera particular de la dinámica urbana. Se consideran actores porque su papel puede cambiar de acuerdo con sus propias motivaciones, o con las circunstancias en las que se ven envueltos. Así podemos afirmar que los fenómenos urbanos, ya sean sociales, económicos, políticos o bien una mezcla de todos ellos, caen dentro de lo que se conoce como **sistema complejo**.

La esencia del comportamiento de un sistema complejo es que el sistema es tan dinámico e interconectado que la alteración de una de sus variables, por más mínima que sea, actúa inmediatamente como causa de variación de las demás. Un sistema complejo se auto-organiza o se auto-regula, generando estructuras espacio-temporales que surgen de lo que aparentemente es un desorden, conocidas como sistemas emergentes.

Aunque la complejidad de los ambientes urbanos involucra varios aspectos, se puede identificar principalmente dos. El primer aspecto está relacionado con la evolución de la **estructura urbana**, esto es, la formación del perfil espacial de la ciudad y la distribución espacial de los individuos. El segundo aspecto está relacionado con las **actividades** que realizan los seres humanos dentro de los ambientes urbanos.

Uno de los objetivos de la planeación urbana es ordenar el crecimiento de las ciudades y al ser el urbanismo una disciplina eminentemente práctica, es indispensable contar con herramientas que nos ayuden para la toma de decisiones, y así tener una planeación más eficiente y eficaz.

Unas herramientas que podemos usar para lograr una planeación eficiente y eficaz son el **modelado** y la **simulación** de los sistemas urbanos.

Los modelos son instrumentos valiosos en lo referente a que ellos representan un “ambiente común y neutral” para la disposición de políticas de intervención, permitiendo examinarlo con un mínimo de subjetividad. Otra ventaja importante de los modelos es que durante su formulación, calibración y uso, el planificador puede aprender mucho, mediante la experimentación, acerca del comportamiento y funcionamiento interno del fenómeno en cuestión y puede obtener conclusiones aplicables al sistema real.

Los modelos en general solo son una representación desde una perspectiva particular de la realidad. Lo mismo aplica para los modelos matemáticos, ya que su valor está limitado a un conjunto de problemas que están representados bajo ciertas condiciones específicas.

La habilidad de elegir y adaptar los modelos a contextos particulares es uno de los elementos más importantes en el bagaje del planificador para poder dar soluciones adecuadas a problemas específicos.

El proceso de ensayar diversas alternativas en el modelo se llama **simulación**, esto con el fin de elegir la mejor alternativa, y así enfrentar mejor una realidad que varía con el tiempo. La simulación es la experimentación con un modelo de una hipótesis o un conjunto de hipótesis de trabajo.

"La simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a cabo experimentos con este modelo con el fin de comprender el comportamiento del sistema y/o evaluar varias estrategias para estudiar el funcionamiento del sistema." (Shannon, 1998).

Para poder modelar fenómenos urbanos se requieren mínimo dos capas de representación. Una capa para representar las unidades de la infraestructura física de la ciudad, y la otra para representar los movimientos de los individuos dentro de las ciudades. Los elementos de infraestructura urbana (unidades de tierra, segmentos de la red vial, edificios, entre otros.) son considerados como fijos, mientras los individuos son potencialmente libres de cambiar su localización de la ciudad.

Una manera de crear un modelo de simulación que implique la interacción de estas dos capas es utilizar modelos basados en la teoría de **los autómatas celulares**.

En el presente trabajo se estudió a la ciudad desde la perspectiva de los autómatas celulares. Así los modelos basados en autómatas celulares consideran el marco espacial en que los actores urbanos se desenvuelven como una malla compuesta por celdas. En ellas, los actores urbanos son entendidos como **objetos computacionales** autónomos, con la capacidad de realizar acciones, percibir su entorno y comunicarse unos con otros, generando nuevos comportamientos.

1.1. Problemática

En el pueblo de Ajusco, que está compuesto por las comunidades de San Miguel y Santo Tomás y sus alrededores, en la Delegación de Tlalpan en el D.F., se han detectado las siguientes problemáticas relacionadas a los cambios de uso de suelo y el crecimiento urbano.

- Crecimiento acelerado y sin un orden aparente del área urbana sobre áreas de conservación ecológica y en zonas agrícolas y forestales, así como en zonas de alto riego como barrancas y causes de arroyos.
- No concuerdan las actividades económicas que se realizan actualmente con los usos de suelo establecidos en el Programa de Desarrollo Urbano Delegacional (2010), los cuales no han sido modificados por lo menos desde el 1997.
- Incumplimiento de las leyes, normas, lineamientos y políticas en materia de los usos del suelo.
- Crecimiento demográfico elevado, lo que impacta directamente en el crecimiento del área urbana.

Los **factores** principales que generan los problemas anteriores son:

Económicos

- Los habitantes originarios del Ajusco han abandonado la actividad agrícola, principalmente porque ya no les es redituable, buscando nuevas formas de sustento, por lo que dejan las tierras sin producir. Es más rentable el uso de suelo urbano que el agrícola.
- Los habitantes originarios tienen un nivel socio-económico bajo.
- Las personas que adquieren un terreno, lo hacen principalmente por los bajos costos, con el riesgo de comprar de forma ilícita.

Por lo anterior varios ejidatarios venden parte de su tierra, principalmente para la construcción de viviendas. Esta venta es tolerada por las autoridades Delegacionales, del D.F. y por los mismos ejidatarios.

Demográficos

- El crecimiento natural es elevado en comparación al Delegacional.
- La inmigración es elevada en comparación a la Delegacional.

Técnicos

- Por la falta de un índice de urbanización no se ha podido ajustar o cambiar los usos de suelo, que actualmente los siguen considerando como rurales.

Es importante medir si ya se dio la transición de lo rural a lo urbano, para hacer las adecuaciones al Programa Delegacional de Desarrollo Urbano.

Políticos – administrativos

- Por falta de capacidad técnico-administrativo tanto a nivel Delegacional, del D.F. o Federal, no se ha realizado un diagnóstico acertado de la situación de la zona de estudio respecto a los usos del suelo.
- Por la existencia de presiones a niveles político, social y económico no se frena el crecimiento desordenado en la zona de estudio.

1.2. Justificación

Existen varias teorías, que incluyen a sus modelos, que tratan de explicar el fenómeno de los cambios de usos de suelo, entre ellos están los enfoques económicos, sociales y ambientales, cada uno con sus características propias. Sin embargo estos modelos por centrarse en un aspecto, dejan de lado las interrelaciones que tienen con los otros.

Por lo que en la presente tesis se plantea la utilización de la teoría de los AC que puede explicar el fenómeno del cambio de uso de suelo, tomando en cuenta tanto aspectos económicos, políticos, social, físicos y ambientales, además se centra en el punto de vista individual, es decir en las decisiones personales y su entorno inmediato para generar la dinámica urbana (los cambios de usos de suelo).

Con la utilización de los AC, además, se tiene la ventaja de poder interactuar con varios aspectos; éstos, a su vez, tienen otras ventajas, como:

- Por su naturaleza son convenientes para comprender fenómenos y procesos a nivel espacial y temporal, relacionando los atributos de sus elementos. Es decir permite simular la evolución del espacio geográfico de una manera directa.
- Se pueden modelar y simular fenómenos complejos a partir de reglas simples, con un alto índice de certeza.
- Los resultados son visuales directamente.
- Se pueden integrar con otras herramientas, como los SIG.

Por lo anterior, resulta una herramienta útil, para generar escenarios futuros, que puedan servir para la toma de decisiones en el proceso de planeación urbana, ya que puede predecir los cambios de los usos de suelo y las tendencias del crecimiento urbano a nivel espacial, temporal y estadístico.

Es importante recalcar que existen una gran variedad de modelos basados en AC que han sido desarrollados para estudiar diversos fenómenos en diversas áreas, como sociales (por ejemplo: segregación o cooperación), biológicos (por ejemplo: evolución, propagación de enfermedades), urbanismo (por ejemplo: transporte o cambios de uso de suelo, ver capítulo 2 sección 2.4.), económicos, matemáticos, químicos; otros ejemplos son: cambio climático, erosión, propagación de un incendio, percolación, entre otros¹.

Por lo que la presente tesis pretende ser un punto de partida para futuras investigaciones que quieran desarrollar modelos y simulaciones de fenómenos sociales en general y en particular de fenómenos urbanos. El modelado y simulación de fenómenos urbanos basados en AC debe ser una herramienta para la toma de decisiones de intervención.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Modelar y simular los cambios de usos del suelo y el crecimiento urbano, usando la teoría de los autómatas celulares, con el fin crear escenarios a corto, mediano y largo plazo, y que sirva de herramienta para apoyar la toma de decisiones en la planificación y el análisis del desarrollo urbano.

1.3.2. Objetivos particulares

- Comprobar que es posible modelar y simular los cambios de usos del suelo con base en la teoría de autómatas celulares en el pueblo de Ajusco.
- Predecir y comprender el comportamiento físico de los cambios de usos del suelo en el pueblo de Ajusco, basados en decisiones individuales de los agentes y su entorno.
- Poder experimentar en ambientes simulados la toma de decisiones de los agentes que intervienen en los cambios de usos del suelo en el pueblo de Ajusco, desarrollando un ambiente computacional o interfaz.
- Enumerar las ventajas del modelado y simulación de los cambios de usos del suelo basados en los autómatas celulares.

¹ Ver el Anexo A.1.2 para referencias a ejemplos de modelos basados en AC en diferentes áreas.

- Generar escenarios de corto, mediano y largo plazo de los cambios de usos del suelo en la zona de estudio.
- Establecer mecanismo de validación de la simulación.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

- Los cambios de usos del suelo pueden ser modelados, simulados y generar predicciones, si se parte de las decisiones individuales de los agentes y su entorno para poder observar el comportamiento colectivo de los mismos.

1.4.2. Hipótesis particulares

- Es posible modelar y simular los cambios de usos del suelo y el crecimiento urbano en el pueblo de Ajusco, a través de la teoría de los autómatas celulares, considerando los aspectos: (1) las conveniencias entre los usos de suelo, (2) el efecto que tiene sobre un uso de suelo específico la existencia de distintos usos de suelo aledaños, (3) el factor de la accesibilidad local, y (4) el nivel del conocimiento del mercado inmobiliario.
- Los sistemas emergentes que surgen de los sistemas complejos se pueden explicar si se entienden las decisiones individuales de los agentes.
- Por lo anterior es posible modelar y simular sistemas urbanos, si se utiliza la teoría de autómatas celulares.

1.5. Contenido y alcances

- **Introducción**
Contenido: Problemática, justificación, objetivos, hipótesis, contenido y alcances, procedimiento de la investigación y límites del proyecto.
- **Marco teórico**
Contenido: Teoría de sistemas complejos y los sistemas urbanos, teoría de los autómatas celulares para el estudio de los sistemas urbanos, teorías de los cambios de usos del suelo, modelos basados en autómatas celulares para el estudio de los cambios de usos del suelo.
- **Casos de éxito de modelado y simulación de sistemas urbanos basados en autómatas celulares**
Contenido: Modelado y simulación de los cambios de los usos de suelo en la ciudad de Cincinnati, Ohio utilizando el modelo de White; modelado y

simulación del crecimiento y densificación del pueblo de San Miguel Topilejo, Tlalpan, D.F. utilizando un modelo evolutivo.

- **Caso de estudio: Los cambios de usos del suelo y crecimiento urbano en el pueblo de Ajusco**
Contenido: Antecedes, evolución de los cambios de usos del suelo, usos de suelo urbano, agrícola, forestal, pastizal, matorral y agroforestal en 2010, el modelado, la simulación, resultados.
- **Conclusiones generales y recomendaciones**

1.6. Procedimiento de la investigación

La información utilizada es tanto documental, estadística y cartográfica, además de datos recolectados en trabajo de campo a través de entrevistas y visitas al sitio.

A continuación se hace un resumen de los pasos que se siguieron en el presente trabajo:

- Primero, se hizo una descripción breve de los aspectos históricos, de localización, físicos, demográficos, socioeconómicos, y jurídicos-administrativos de la zona de estudio para tener un marco de referencia.
- Segundo, se hizo una revisión de la evolución de los cambios de uso de suelo de los años 1970, 1997, 2000 y 2005, tanto a nivel estadístico como espacial, para ver las tendencias de estos cambios.
- Tercero, se tomó como base los datos de los usos del suelo del año 2005 para el modelado de la zona de estudio, de acuerdo a los parámetros definidos por White en su modelo basado en la teoría de los autómatas celulares.
- Cuarto, se realizó la simulación para los años 2010, 2015 y 2020.
- Quinto, se hizo un estudio de las áreas de los usos de suelo para el año 2010, a partir de fotos aéreas, considerándolos como datos reales y actuales.
- Sexto, al tener los datos de la simulación del año 2010 serán comparados con los datos reales de ese mismo año, así se podrá comprobar que las hipótesis planteadas fueron ciertas, cumpliéndose y validando los objetivos del trabajo.

Se establecerán tres mecanismos de validación de la simulación, uno cualitativo (por observación) y dos cuantitativos, uno estadísticos y el otro

con el empleo del algoritmo RMSE, para saber el grado de similitud entre las imágenes simuladas y la real.

- Séptimo, una vez validados los datos de la simulación y al tener un grado alto de certeza de las mismas, se podrán usar las simulaciones de los años 2015 y 2020 como herramientas de planeación a corto y mediano plazo.

1.6.1. Delimitación espacial

- Pueblo de Ajusco (San Miguel y Santo Tomás) y sus alrededores en la Delegación de Tlalpan en el D.F.

1.6.2. Delimitación temporal

- Con cartografía de los años 1970, 1997, 2000 y 2005, como antecedentes.
- Año base de simulación: 2005.
- Años simulados de la zona de estudio:
 1. 2010
 2. 2015
 3. 2020

1.6.3. Fuentes de datos e indicadores

- INEGI
 1. Con datos del censo 2000.
 2. Con datos del conteo 2005.
 3. Con datos del censo 2010.
- Plan de Desarrollo Urbano Delegacional de Tlalpan del 1997.
- Plan de Desarrollo Urbano Delegacional de Tlalpan del 2010.
- Secretaría de Desarrollo Urbano del D.F.
- PAOT y Centro Geo.
 1. Con cartografía de los años de 1970, 1997, 2000 y 2005 .
- Google Earth.
 1. Fotografía área del año 2010.
- Entrevistas y visitas al sitio de estudio.

1.6.4. El modelado y simulación como herramienta para la planeación urbana

Los tomadores de decisiones que pueden ser políticos, administradores o los mismos habitantes, al definir cuáles son las carencias, problemas o aspiraciones de los habitantes de una zona, ciudad o región, y al querer eliminarlos (carencias), solucionarlos (problemas) o alcanzarlas (aspiraciones), deben de contar con metodologías y herramientas que les ayuden a realizar una **planeación urbana** eficiente y eficaz, lo que permitirá decidir cuáles de los proyectos propuestos se deben llevar a la práctica para lograr sus objetivos y metas.

Las etapas mínimas de una metodología que se deben realizar para una planeación eficiente y eficaz son:

- Diagnóstico,
- Determinar los objetivos, prioridades a corto, mediano y largo plazo,
- Diseño de estrategias, políticas y programas,
- Definir los proyectos y acciones específicas,
- Definir metas e indicadores,
- Tener un seguimiento y por último
- Realizar una evaluación.

Algunas herramientas que se usan en la planeación son:

- Programación,
- Análisis del punto de equilibrio,
- Programación lineal,
- Teoría de filas de espera,
- Teoría de probabilidades,
- **Simulación.**

El **modelado y simulación** de los fenómenos urbanos son unas herramientas de la planeación, los cuales tienen el potencial de **predecir los impactos** de los **proyectos** a realizar, **generando alternativas** de acuerdo a los objetivos y metas de la planeación.

Se ha observado que el fracaso total o parcial de algunos programas urbanos no es por una falta de políticas en relación a la planeación urbana, sino que, por un lado, está la no aplicación de las políticas y por otro lado el desconocimiento de las autoridades y de los mismos habitantes de los impactos que generan los fenómenos urbanos, principalmente los no planeados y en muchos casos realizados de forma ilícita y tolerada por las autoridades y los mismos habitantes, ya sea por motivos políticos, económicos o sociales. Los efectos de estos fenómenos urbanos muchas veces no se pueden detectar de forma inmediata, sino a mediano y largo plazo, incidieron directamente sobre la misma población, que en principio resolvió un problema, sin saber que posteriormente se generarían otros, que posiblemente sean más graves.

Con la creación y el uso de modelos y la simulación de fenómenos urbanos a través de los AC se pueden generar escenarios, tanto a corto, mediano y largo plazo de los efectos de los fenómenos que se estén dando en una zona, siendo una herramienta para poder llevar al éxito los programas de desarrollo urbanos, adecuándose a la evolución de la zona, ya que en muchas ocasiones los planes de desarrollo urbano ya no concuerdan con la realidad de la zona.

Por lo que la utilización de modelos y su simulación en planificación urbana pueden resultar de sumo interés como herramienta de apoyo para los tomadores de decisiones.

1.7. Límites del proyecto

Existen modelos que utilizan el enfoque de autómatas celulares (agentes) para modelar y simular un sistema urbano, tomando en cuenta las relaciones que existen entre los usos de suelo, el transporte, la economía, el medio ambiente, las políticas locales, selección del lugar de vivienda, selección del lugar del trabajo, aspectos demográficos, de movilidad, el desarrollo inmobiliario, los precios de la tierra, entre otros. Con lo anterior se puede apreciar la potencialidad que tiene este enfoque de modelado y simulación.

Sin embargo, uno de los objetivos del presente trabajo es el de entender la teoría y el funcionamiento de los autómatas celulares en general.

Al tener las bases teóricas de los AC, serán aplicados a un solo fenómeno urbano, en este caso se van a utilizar para explicar los cambios de los usos de suelo y el crecimiento urbano en una zona específica.

La no utilización de un modelo que integrara diversos sistemas se debió principalmente a la gran cantidad de información que se requería para alimentar un modelo de este tipo, que si bien es de mayor utilidad, no es el objetivo de este trabajo.

Además se dejan las bases para que en este tipo de análisis se pueda utilizar en un modelo en donde se puedan integrar más sistemas, tanto a nivel urbano, regional y tal vez nacional.

2. Marco teórico

2.1. Sistemas complejos y sistemas urbanos

2.1.1. Introducción

“El enfoque del estudio de los sistemas complejos implica el estudio de las interacciones entre fenómenos de distintos dominios disciplinarios. Al no pretender descubrir ‘hechos dados’, ni relaciones específicas determinadas por propiedades ‘permanentes’ de los elementos del sistema, se va más allá de la producción de respuestas parciales a problemas parciales. La investigación de sistemas complejos busca una integración del objeto de estudio que se enriquece con nuevas propiedades y características y no se reduce a una mera integración de disciplinas. El cometido es rescatar la unidad en la diversidad, la especialidad en la universalidad.”¹

La interdisciplinariedad es esencial para el estudio de sistemas complejos, apoyándose siempre en los estudios disciplinarios especializados.

2.1.2. Teoría de la complejidad

La teoría de la complejidad engloba varias teorías, entre ellas: **la teoría de los sistemas complejos adaptativos**, la dinámica no lineal, la teoría de los sistemas dinámicos, la teoría del no-equilibrio y la teoría del caos.

Es “**un aporte capaz de explicar cualquier sistema complejo en función de unas pocas reglas**” (Lewis 1992, en Reynoso 2006), que permite estudiar los problemas inabordables en las ciencias sociales o naturales.

La complejidad no se debe de entender como algo desorganizado, pues muchos fenómenos complejos tienen la capacidad de auto-organizarse.

2.1.2.1. Teorías de los sistemas complejos

Los primeros trabajos teóricos y prácticos que trataron con los sistemas complejos aparecieron en la década de 1940. Estos marcos conceptuales se pueden clasificar en dos grandes series (Reynoso, 2006).

Por un lado están los paradigmas globales de la complejidad, y por el otro una colección de algoritmos más focalizados que permiten modelar procesos emergentes.

¹ Duval, Guy. “Teoría de Sistemas, una perspectiva constructivista”, en Ramírez, 1999.

Paradigmas globales de la complejidad

En orden cronológico están:

- 1) La **cibernética** propuesta por Norbert Wiener en la década de 1940 y basada en los mecanismos de retroalimentación y control.
- 2) La **teoría general de los sistemas**, formulada por Ludwig von Bertalanffy en la década de 1950, que pone énfasis en la organización de la estructura y la dinámica de los sistemas como conjunto de componentes y relaciones con propiedades distintas a la de sus componentes aislados.
- 3) Las **teorías de las estructuras disipativas** propuesta por Prigogine en la década del 60, con énfasis en el desequilibrio y en el papel del individuo.
- 4) La **teoría de catástrofes**, una rama cualitativa de las matemáticas que estudia las singularidades o procesos de ruptura y crisis. Las ideas originales de este paradigma fueron desarrolladas por René Thom en la década del 60 y están sustentadas en el estudio de las topologías formales de distintos tipos de fenómenos.

Algoritmos para modelar procesos emergentes

Paralelamente se desarrollaron los algoritmos de la complejidad, que también nacieron en la década de los 40's con los **autómatas celulares** propuestos por Von Neumann.

Estos algoritmos permiten modelar procesos emergentes. Por lo común constituyen agentes que responden a un mismo principio constructivo: la iteración o ejecución de una función relativamente simple, que resulta en capacidades robustas de resolución de problemas o modelado de procesos arbitrariamente complejos.

Esta clase de algoritmos incluyen a los **autómatas celulares**, las redes booleanas aleatorias, los algoritmos evolutivos (programación evolutiva, estrategia evolutiva, algoritmos genéticos), redes neuronales y la geometría fractal, entre otros.

2.1.2.2. Sistemas complejos

“Un *sistema complejo* está compuesto por varias partes interconectadas o entrelazadas cuyos vínculos contienen información adicional y oculta al observador.”²

“Como resultado de las interacciones entre elementos, surgen propiedades nuevas que no pueden explicarse a partir de las propiedades de los elementos

² http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_complejo

aislados. Dichas propiedades se denominan propiedades emergentes.”³ Se dan por micromotivos individuales generando macroconductas grupales.

“Un sistema surge (emerge) en un proceso de reducción de complejidad; es menos complejo que su entorno y sus límites respecto a él no son físicos, sino de sentido. El problema de la extrema complejidad del mundo es la condición que hace posible el estudio de los sistemas que en él existen” (Luhmann 2002).

2.1.3. Sistemas emergentes

El término sistema emergente o “emergencia”, se aplica a aquellas propiedades de un sistema complejo que surgen a partir de un cierto nivel de complejidad.

En estos sistemas los agentes que residen en una escala comienzan a producir comportamientos que se muestran en una escala superior a la suya (macroconducta observable), por ejemplo: las hormigas crean colonias, los habitantes de una ciudad crean barrios, las células se unen formando organismos.

La evolución de reglas simples a complejas es el sistema emergente.

Johnson (2003) define las características principales de un sistema emergente:

1. Son **sistemas ascendentes** porque su comportamiento viene de la *base*. La actuación local produce un comportamiento global. Pero a nivel individual hay ignorancia del superorganismo, no hay conciencia del comportamiento a nivel global.
2. Se basan en la **auto-organización**. Estos sistemas adquieren una personalidad que se auto-organiza a partir de millones de decisiones individuales.
3. **Creación de patrones**. A partir de acciones locales emergen patrones globales. El rastreo del sistema para reconocer y encontrar los patrones es esencial.
4. **Interacción**. Los elementos del sistema deben prestar atención a sus vecinos. Los encuentros deben ser casuales. Como más elementos haya, más éxito tendrá el sistema.
5. **Retroalimentación**. Influencias mutuas entre vecinos, relaciones recíprocas. Retroalimentación negativa: mecanismo que busca un equilibrio o un fin para el sistema. Compara el estado presente del sistema con su estado deseado.
6. **Reglas** que gobiernan los micromotivos (elementos individuales), los conducen según sus acciones. Al cambiar una variable, aunque sea sólo una, emerge un nuevo sistema. Las reglas sólo gobiernan los **micromotivos**, la **macroconducta** se genera sola.
7. Del caos y del desorden aparente se forman **grupos** de intereses compartidos o patrones de conducta.

³ http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_complejo

2.1.4. La complejidad de los sistemas sociales

El comportamiento complejo es inherente a fenómenos socioeconómicos y se refiere a las siguientes características:

1. Un fenómeno complejo es resultado de la concurrencia de un gran número de factores.
2. Estos factores interactúan entre sí de forma no lineal.
3. El comportamiento del fenómeno complejo es no determinista e impredecible.

Los fenómenos sociales son complejos, pues se hallan en complejas redes de interacción e interdependencia mutua. Es decir, un sistema social está constituido por un conjunto de individuos que interactúan mutuamente entre sí y con su entorno social.

Los sistemas sociales requieren de modelos explicativos, en los que múltiples factores cambiantes interactúan con el fenómeno que se trata de explicar y entre sí mismos. Los individuos evolucionan de forma autónoma (tienen su idiosincrasia particular), están motivados por sus propias creencias y objetivos personales, y las circunstancias del entorno social en el que se mueven moldean en gran medida dichas creencias y objetivos personales.

Además, su conducta cambia en el tiempo, ya sea, debido al cúmulo de experiencias que son irrepetibles y únicas en cada individuo, o por el momento que atraviesa en su ciclo vital o por los cambios de las tendencias sociales (cambios en el entorno). **Es importante señalar que la población evoluciona demográficamente y esto tiene repercusiones a nivel micro y a nivel macro.**

A **nivel micro**, los individuos toman decisiones por motivaciones personales, los cuales muchas veces están sujetos a su ciclo de vida, específicamente por aspectos demográficos: se casan, tienen hijos y se mueren, pasando por diversas etapas en las que se sujetan a distintos patrones de comportamientos e intenciones.

A **nivel macro**, estos aspectos demográficos tienen implicaciones sobre el sistema social (influyen en éste y son influidas por éste) y por lo que tienen la capacidad de interacción dinámicamente con otros procesos sociales.

Por otro lado, es preciso tener en cuenta que la gran mayoría de los fenómenos sociales no están sujetos a leyes, sino a tendencias, las cuales pueden afectar a los individuos probabilísticamente. La indeterminación de los procesos y los sistemas sociales es mucho mayor que en los sistemas físicos o incluso los biológicos.

Todos estos determinantes contribuyen a que un sistema social sea altamente dinámico y complejo y por ello su reductibilidad mediante el recurso del modelado matemático adolece de serias limitaciones, tanto desde el interés explicativo como predictivo.

El principal problema de los modelos matemáticos es que sólo permiten jugar con tendencias (probabilísticas) y no considera el comportamiento original del sujeto, pieza básica de cualquier sistema social. Los efectos dinámicos de procesos altamente retroalimentados no quedan bien reflejados en los tratamientos matemáticos-estadísticos, y sin embargo dichos procesos son muy comunes en los sistemas sociales reales.

Por lo anterior es necesario probar con otras herramientas o enfoques para el modelado de los fenómenos sociales.

Una opción es la utilización de los **Autómatas Celulares (AC)**. Un sistema de simulación basada en AC permite ejecutar un conjunto de AC, que pueden ser de distintos tipos, en un entorno en el cual se pueden realizar observaciones de su comportamiento. Estas observaciones permiten analizar el **comportamiento colectivo emergente** y las tendencias de la evolución del sistema.

2.1.4.1. Micromotivos y macroconductas (Schelling, 1989)

Thomas C. Schelling, es economista estadounidense, nació el 14 de abril de 1921 en Oakland en el estado de California.

Schelling realiza una exploración socioeconómica, en su libro “Micromotivos y Macroconductas”, acerca de los motivos de ciertas conductas de las personas, como por ejemplo: cómo la gente se aparta y se integra en función de su sexo, edad, idioma, raza y clase social, pautas familiares y de amistad así como gustos.

Dice Schelling que las personas tienen motivos para tomar sus decisiones tanto de manera consciente como inconscientes, siendo estos últimos la parte que explora el autor para explicar las **conductas sociales emergentes**.

Este tipo de análisis explora la relación entre las características de conducta de los individuos que integran algún agregado social y las características del agregado.

Él trata de deducir qué intenciones o tipos de conducta de individuos separados pudiera conducir la pauta que observamos.

Los individuos responden a su entorno que consiste en la respuesta de otra gente a su entorno, el cual consiste en la gente que responden a un entorno de respuestas de personas. A veces esta dinámica funciona por secuencia.

Para hacer esas conexiones por lo regular tenemos que observar el sistema de interacción que se da entre los individuos y su entorno, es decir, entre unos individuos y otros o entre los individuos y la colectividad.

A veces los resultados son sorprendentes y en ocasiones no se deducen fácilmente. A veces el análisis resulta complicado y en ocasiones no produce conclusiones.

Schelling trata de deducir qué intenciones o tipos de conducta de individuos separados produce las pautas que observamos, es lo que entendemos como **micromotivos y macroconductas**.

La gente toma sus propias decisiones y su conducta por lo regular se encuentra motivada hacia sus propios intereses, y a menudo son influenciadas solo por un fragmento local del modelo general.

Resulta más compleja la conducta de la gente que desea estar cerca de otras personas o estar alejada de tipos particulares de personas. La gente se separa y se integra por el sexo, la raza, la edad, el idioma, el vestido o la categoría social, o por pautas de familiaridad y amistad. Los motivos de los individuos pueden producir resultados colectivos asombrosos e inesperados.

2.1.4.2. El nivel social y el nivel individual (Simmel, 2002)

Georg Simmel (Berlín, 1 de marzo de 1858 – Estrasburgo, 28 de septiembre de 1918) fue un filósofo y sociólogo alemán. Se centró en estudios microsociológicos, su principal contribución se encuentra en el ámbito de la sociología, especialmente en el análisis de los procesos de individualización y socialización.

“Todos somos fragmentos no sólo del hombre en general, sino de nosotros mismos”. Simmel.

En diversos fragmentos de la obra de Simmel están los fundamentos de una sociología del mercado que considera los procesos de racionalización de la estructura social y los espacios de interacción.

¿Qué rasgos distinguen a la sociedad que genera una socialización, es decir a la vida de grupos como unidad? Desde el punto de vista exterior, las diferencias son varias, en principio, la inmortalidad del grupo frente a la desaparición del ser humano singular, la posibilidad del grupo de excluir elementos muy importantes sin extinguirse y que para la vida individual significaría la aniquilación. Con independencia de si se considera la unidad del grupo más allá de sus individuos como una ficción o una realidad, hay que tratarla como si fuera un sujeto con vida propia, leyes propias y rasgos de carácter propios.

Las actuaciones de las sociedades son mucho más eficaces en perseguir fines que las de los individuos. Un individuo se vería empujado por sentimientos, impulsos y pensamientos contradictorios en una y otra dirección, no sabría decidir en absoluto en todo momento entre las posibilidades de su comportamiento con firmeza subjetiva y mucho menos aún con acierto objetivo; el grupo social, en cambio, uno que cambiase a menudo sus orientaciones de acción, estaría en cada momento resuelto sin vacilaciones a favor de una y avanzaría directamente, sobre todo, siempre sabría a quien considerar su enemigo y a quien su amigo.

Entre querer y hacer, medios y fines de una generalidad existirían menos discrepancias que en los individuos. **En esta relación, los individuos aparecerían más “libres”, mientras que los actos de una masa estarían determinados por “leyes naturales”.**

Las metas públicas de una colectividad en general, corresponden a aquellas que en el individuo suelen presentarse como sus más fundamentales y primitivas. La masa no conoce el dualismo entre impulsos egoístas y altruistas en que el individuo se encuentra a menudo sin poder resolverlo y que tantas veces hace que, a través de ambos, se quede en el vacío. Se ha llamado a este hecho como el “**mínimo ético**” aplicado a grandes y pequeñas masas. Es decir para el individuo sólo es el mínimo con el que puede vivir exteriormente como ser social.

También las grandes masas a menudo tienen una sensibilidad, una pasión y excentricidad que apenas se mostraría en un miembro suyo en particular.

Uno de los fenómenos más instructivos y puramente sociológico es que el individuo, por las olas del “estado de ánimo” de la masa que lo rodea, se siente como raptado por una fuerza exterior e indiferente a su ser y su voluntad individuales; y esto es así a pesar de que esta masa se compone exclusivamente de tales individuos, no hay nada más que el efecto recíproco de su actuación, que despliega una dinámica que por su magnitud aparece como algo objetivo y oculta a cada uno de su propia contribución; porque, de hecho, el individuo mismo también arrastra, en la media en que es arrastrado.

2.1.5. El sistema urbano como sistema complejo

Para entender a la ciudad es necesario comprender sus procesos, estructuras, función, interrelaciones, componentes y naturaleza. Por otro lado también se puede decir que las ciudades están constituidas por una infraestructura física y organizacional que permite el desarrollo de las diferentes actividades de sus habitantes. Las ciudades son el producto de sus habitantes y las actividades que realizan en ella. Todos los elementos anteriores se combinan e integran un sistema complejo. Wilson lo denominó **sistema espacial complejo**. Las personas y las organizaciones, así como la infraestructura que utilizan ambos, conforman los componentes básicos de los sistemas espaciales complejos. Estos

componentes pueden ensamblarse en una gran variedad de formas a distintas escalas y así conformar distintos sistemas.

Las ciudades como sistemas espaciales complejos contienen dos dimensiones explícitas de estudio: **la espacial y la funcional**. Su estudio requiere una gran variedad de disciplinas.

Al utilizar la teoría de los sistemas complejos para analizar los sistemas espaciales complejos es necesario tomar en cuenta dos aspectos. El primero está relacionado con la evolución de la estructura urbana, esto es, la formación del perfil espacial de la ciudad y la distribución espacial de los individuos y sus actividades dentro de la zona urbana. El segundo aspecto se relaciona más con las actividades de los seres humanos en los ambientes urbanos.

Gilber y Conde (1995) nos dicen que: “muchas veces la única manera de estudiar y entender los sistemas complejos es mediante la construcción de un modelo de simulación.”

Para poder realizar un modelo de una ciudad se requieren mínimo tomar dos aspectos que deben ser representados: un aspecto es para representar las unidades de la infraestructura física de la ciudad, y el otro aspecto es para representar los movimientos de los individuos dentro de las ciudades.

Los elementos de la infraestructura urbana, las redes viales, edificios, etc., se consideran como fijos, mientras que los individuos y los usos que hacen de esa infraestructura tienen en principio un libre albedrío, tanto para cambiar el uso de suelo de su propiedad, de trabajo, de casa, entre otros aspectos.

Una manera de crear un modelo de simulación que implique la interacción de estos dos aspectos, es mediante el uso de los autómatas celulares.

En estos modelos se considera el marco espacial en el que los actores urbanos se desenvuelven en una malla compuesta por celdas.

Así los actores urbanos son entendidos como objetos computacionales autónomos, que tienen la capacidad de realizar acciones, percibir su entorno y comunicarse unos con otros para cambiar de estados, tanto espacial, temporal como de función.

2.2. El empleo de autómatas celulares para el estudio de los sistemas urbanos

2.2.1. Los Autómatas Celulares (AC)⁴

Autómata del griego *automatos* (αὐτόματος) que significa *espontáneo* o *con movimiento propio*.

Célula (del latín *cellula*, diminutivo de *cellam*, celda, cuarto pequeño) es la unidad morfológica y funcional de todo ser “vivo”.

Los autómatas celulares fueron ideados por John Von Neumann y Stanislaw Ulman en la década de 1940 para modelar procesos biológicos tales como la autorreplicación de organismos. El objetivo de estos investigadores era encontrar un mecanismo idealizado que generase comportamientos complejos a partir de reglas o interacciones simples entre elementos iguales y cercanos espacialmente.

Un AC es un modelo para un sistema dinámico que evoluciona en pasos discretos. Es adecuado para modelar sistemas naturales o sociales que puedan ser descritos como una colección masiva de objetos simples que interactúen localmente unos con otros.

Los AC son parte de los sistemas dinámicos discretos. Se entiende por sistema a la unión de varias partes conectadas en una forma organizada, de tal manera que las partes se afectan unas a otras por el solo hecho de pertenecer al sistema. Por otro lado, son sistemas dinámicos porque la unión de estas partes “hace algo” conforme transcurre el tiempo. Mientras que son discretos en el sentido de que la evolución (el cambio de un estado a otro) en el tiempo y en el espacio es hecha a través de pasos finitos y contables.

Los AC son redes de autómatas simples conectados localmente. Cada autómata simple, que por lo regular es un autómata finito determinista, produce una salida a partir de varias estradas, modificando en el proceso su estado según una función de transición. Por lo general, en un AC el estado de una célula en una generación determinada depende, única y exclusivamente, de los estados de las células vecinas y de su propio estado en la generación anterior.

Un AC está definido por una cuádrupla, $A = (\mathbf{S}, \mathbf{d}, \mathbf{N}, \mathbf{f})$ donde \mathbf{S} es un conjunto finito; \mathbf{d} es un entero positivo; $\mathbf{N} \subset \mathbb{Z}^{\mathbf{d}}$, es un conjunto finito, y $\mathbf{f} : S^{\mathbf{N}} \rightarrow S$, es una función arbitraria local. El conjunto de los estados posibles lo representa \mathbf{S} . La dimensión del autómata lo representa \mathbf{d} . El espacio celular, el cual está en función de la dimensión del autómata, lo representa \mathbf{N} .

⁴ <http://www.wolframscience.com/nksonline/page-876b-text>: “Historia de los autómatas celulares”

N es un subconjunto del producto cartesiano del conjunto de los enteros con signo igual. Si el valor de d es 1, entonces la dimensión del autómata es uno y se dice que el autómata es unidimensional. Si el valor de d es 2, entonces el autómata es bidimensional.

La imagen que puede formarse con respecto a la dimensión de un autómata es que los elementos del espacio celular (celdas) se acomodan en un arreglo espacial, ya sea éste una línea, un plano, un espacio, etc. Si el arreglo es unidimensional, las celdas están acomodadas una tras otra en una línea y sus coordenadas son solo un número entero (Fig.2.2.1.a). Si el arreglo es bidimensional, entonces las celdas están acomodadas en forma de malla y se necesitan dos coordenadas (Fig. 2.2.1.b). Es posible seguir construyendo arreglos de más dimensiones. Sin embargo, los autómatas más comunes se construyen en una o dos dimensiones.

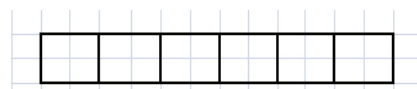


Figura 2.2.1.a Arreglo unidimensional

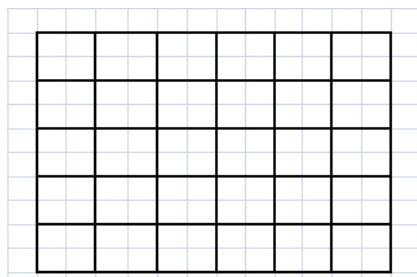


Figura 2.2.1.b Arreglo bidimensional

La función $f : S^N \rightarrow S$ representa la regla que asigna a los elementos del espacio de estados, los cuales están acomodados en un arreglo específico d-dimensional, un elemento del mismo espacio de estados. Las reglas de evolución del autómata funcionan sobre la base de un subconjunto específico de N . Este subconjunto recibe el nombre de vecindad. Si se considera un arreglo bidimensional, entonces son de uso común las siguientes definiciones de vecindad:

1. La vecindad de Von Neumann⁵. Esta vecindad se encuentra conformada por cuatro celdas, las celdas arriba y abajo, derecha e izquierda, alrededor de una celda central. El radio de la vecindad indica la cercanía de las celdas a considerar. En la figura 2.2.1.c.1 se aprecia la forma de la vecindad de Von Neumann, en este caso el radio es 1.

⁵ <http://mathworld.wolfram.com/vonNeumannNeighborhood.html>

2. La vecindad de Moore⁶. Es una extensión de la vecindad de Von Neumann, la cual contiene además las celdas en la diagonal. En la figura 2.2.1.c.2 se muestra esta vecindad de radio 1.
3. La vecindad extendida de Moore. Es equivalente a la vecindad de Moore, pero la vecindad extiende su distancia hacia el siguiente conjunto de celdas adyacentes. Aquí el radio es $r = 2$. Figura 2.2.1.c.3.

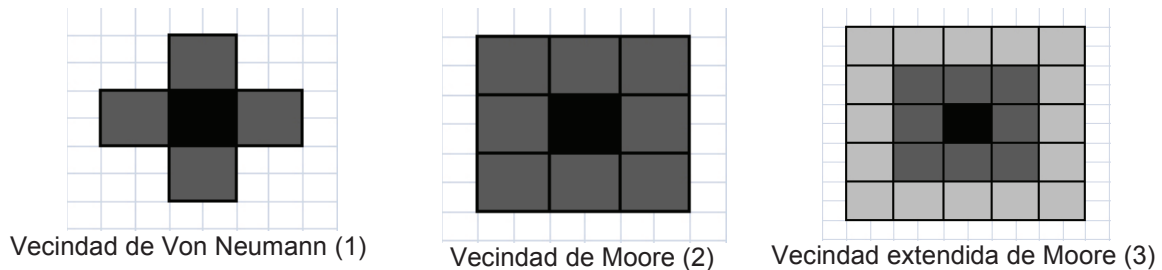


Figura 2.2.1.c. La celda más oscura es la celda central. Las celdas claras están en la vecindad

Otro concepto importante asociado con las vecindades es el radio, que indica la cercanía de las celdas que deben considerarse. En el caso de las vecindades de Von Neumann y de Moore tiene valor de 1, ya que solamente se consideran los vecinos más cercanos. Mientras que en la vecindad extendida de Moore el radio es mayor a 1.

El espacio de las reglas del autómata celular define la dinámica del autómata. Aunque las reglas de transformación de estado pueden ser muy variadas y complicadas, existen dos tipos generales de reglas, a saber:

1. En el primer tipo todo grupo de estados de las celdas de la vecindad está referido al estado de la celda central.
2. El estado siguiente de la celda central depende solamente de la suma de los estados actuales de las celdas vecinas.

El número de celdas en el espacio celular tiene que ser finito, llevando al problema de la indeterminación al considerar las celdas que se encuentran en los bordes del espacio celular. Para resolver este problema hay dos soluciones comunes:

1. Pegar entre sí las celdas localizadas en los bordes opuestos. De esta manera, un arreglo unidimensional se convierte entonces en un arreglo circular, mientras que un arreglo bidimensional se convierte en un arreglo toroidal, figura 2.2.1.d. Cabe señalar que éste es el método más utilizado.
2. Reflejar las celdas de los bordes. La consecuencia es la propiedad de fronteras simétricas.

⁶ <http://mathworld.wolfram.com/MooreNeighborhood.html>

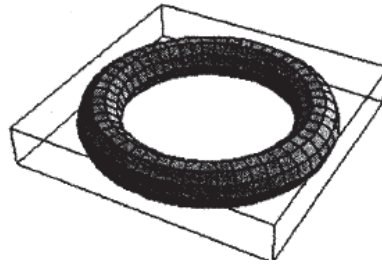


Figura 2.2.1.d. Cerradura toroidal de un espacio celular bidimensional

2.2.1.1 Autómatas celulares estocásticas

Los autómatas celulares, tal y como se han establecido hasta ahora, tienen un limitante poder de modelado debido a la naturaleza determinista de los AFD⁷ con los que están formados. Un segundo nivel de complejidad se logra permitiendo que los autómatas finitos sean no-deterministas. La dinámica global de un autómata celular cuyos autómatas finitos son no-deterministas no es una función sino una relación entre configuraciones.

Este tipo de autómatas no-determinísticos es muy útil para modelar sistemas de actividades sociales, en donde la dinámica del sistema se considera de naturaleza estocástica y por lo tanto se deben tomar en cuenta aspectos probabilísticos en la evolución, permitiendo un comportamiento no determinístico.

En este caso, la función de transición asigna a cada estado un conjunto finito de posibles estados hacia los cuales puede evolucionar el autómata finito.

Hay dos maneras de construir un autómata celular estocástico. La primera es permitir que las funciones de transición se escojan aleatoriamente de un conjunto de reglas determinísticas. La segunda consiste en asignar una regla de transición local probabilística. **El autómata celular de White⁸ pertenece a la segunda categoría.**

Definición: Un autómata celular estocástico o probabilística es una tripla (Γ, N, M) tal que:

1. Γ, N, M tienen el mismo significado que en el caso de un autómata celular determinístico.
2. la función de transición $\delta: Q \times Q^d \rightarrow Q$ es estocástica, es decir,

$$\delta(x_i, x_{i+1}, x_{i+2}, \dots, x_{i+d})$$

en donde toma un valor x_k con probabilidad $f(x_k)$, donde $\sum_{x_k \in Q} f(x_k) = 1$.

⁷ AFD: Autómata Determinístico Finito

⁸ White, 1996. Se explicará en la sección 2.4.3.

2.2.2. Los autómatas celulares en las ciencias sociales

2.2.2.1. Matriz de correspondencia

Hegselmann, en Reynoso 2006, realizó una matriz de correspondencia, que ayuda a comprender las analogías entre los AC y las problemáticas del cambio social.

	Autómatas Celulares	Dinámica social
Unidades básicas	Las celdas son las unidades básicas o los átomos de un AC	Los individuos son generalmente las unidades básicas de la sociedad
Estados posibles	Las celdas se encuentran en un estado tomados de un conjunto de estados posibles	Los individuos realizan ciertas elecciones, adoptando ciertas aptitudes y operan de ciertas maneras emocionales
Interdependencia	El estado de una celda central afecta a los estados de sus vecinos y viceversa	Los individuos se afectan mutuamente
Localidad	Las reglas de transición son locales	Los individuos solo se afectan entre sí localmente, en una cierta vecindad, y la información sobre ellos es también local
Superposición	Las vecindades se superponen	A menudo las interacciones poseen una estructura superpuesta
Aplicaciones y tareas	Aplicaciones en matemática y física: <ul style="list-style-type: none"> • Modelación de orden y emergencia • Efectos macro explicados por reglas micro • Modelación de procesos dinámicos 	Tareas pendientes para la comprensión de fenómenos sociales: <ul style="list-style-type: none"> • Compresión de emergencias y orden • Compresión de relaciones micro-macro • Compresión de dinámica social

Tabla 2.2.2.4 Autómatas Celulares en las Ciencias Sociales según Hegselmann, en Reynoso 2006.

2.2.2.2. Usos de los autómatas celulares en los sistemas sociales

Axtell (2000), nos dice que existen tres usos principales de los modelos y la simulación basados en AC en los fenómenos sociales, aunque se pueden aplicar a otras áreas.

- Primer uso, el simple, conceptualmente es muy similar a una simulación tradicional y se utiliza cuando las ecuaciones que describen al fenómeno social se pueden formular totalmente y son solubles en forma explícita, ya sea analítica o numéricamente; en este caso el modelo y su simulación es una herramienta para la presentación y visualización de los resultados.
- El segundo uso es el más común y se emplea cuando los modelos matemáticos pueden ser escritos pero no se pueden resolver completamente, en este caso la simulación puede dar pistas a las posibles soluciones, mostrando las propiedades dinámicas del modelo, sirviendo

para probar la dependencia de los resultados sobre los parámetros y supuestos y ser una fuente de contra-ejemplos.

- El tercer uso que se les da a los modelos basados en AC y agentes, es porque existen problemas en los cuales no es trivial escribir las ecuaciones que describan al fenómeno social. En tales circunstancias, el empleo de modelos computacionales basados en AC y agentes puede ser la única forma disponible para explorar estos procesos de forma sistemática.

2.2.3. Los autómatas celulares en los sistemas urbanos

Los AC ofrecen un enfoque interesante e innovador para el estudio de los sistemas urbanos. Los modelos basados en AC se han empleado en la exploración de una amplia gama de fenómenos urbanos, por ejemplo, para la simulación del tráfico, para el estudio de la urbanización a escala regional con la dinámica de los usos del suelo, el policentrismo, la urbanización histórica y el desarrollo urbano, entre otros. La popularidad de los modelos urbanos basados en AC se debe en parte a la debilidad existente de los modelos urbanos, pero también se debe a muchas propiedades ventajosas que ofrecen AC.

2.2.3.1. Ventajas de la utilización de AC para la simulación urbana⁹

Espacialidad

Los AC están particularmente adaptados para tratar con los fenómenos espaciales. Las técnicas tradicionales de modelado urbano a veces tienen una tendencia a la abstracción de los detalles espaciales. Los AC, por el contrario, hacen un uso implícito de la complejidad espacial. Además, los AC son buenos en el manejo de espacios contiguos. El espacio absoluto ofrece un marco a priori de referencia (del sitio) y el espacio relativo maneja las relaciones espaciales entre objetos (situación), entonces el espacio contiguo es el espacio que conecta a los dos, que une el sitio y la situación a través del concepto del barrio. "Un barrio rodea un punto localizado o lugar, además que también encarna el concepto de proximidad a ese lugar, que es una relación" (Couclelis 1997 en Torrens 2000).

Enfoque descentralizado

Otra de las ventajas de los AC es su enfoque de procesamiento en paralelo, en particular, es que son muy descentralizados. Lo más importante para los estudios urbanos, es que las ciudades son descentralizadas. El núcleo antiguo monocéntrica y sus barrios satélites está dando paso rápidamente a los sistemas de ciudad policéntrica dispersas en una red mucho menos centralizada de relaciones y una estructura espacial que se forma por las fuerzas centrífugas, en lugar de la actividad centrípeta.

⁹ Torrens, 2000.

La afinidad con los sistemas de información geográfica y teledetección

Los AC tiene una "afinidad natural" con datos tipo "raster". Ellos parecen estar bien adaptados a la información de los SIG y la teledetección. Hay otras similitudes entre los AC y los SIG. Tanto los AC como los SIG organizan el espacio en unidades discretas de área (mallas en AC, y polígonos o redes en SIG). Además, los AC y los SIG representan información de atributos de una manera estratificada (capas en los SIG y los espacios-estados en AC), y manipulan la información con operadores (técnicas de recubrimiento, por ejemplo, en los SIG y las reglas de transición en AC). En muchos casos, los datos de estado se pueden recolectar en un SIG por medio de imágenes satelitales, antes de ser utilizados o analizados por los AC.

Otros autores han sugerido una vinculación más estrecha entre AC y los SIG, sugiriendo que los AC pueden actuar como el "motor analítico" de un SIG.

La atención al detalle

Antes de la llegada de las computadoras, sólo podíamos estudiar los sistemas con un número limitado de los mecanismos de interacción, asumiendo que los elementos individuales mostrarán un típico comportamiento promedio. El comportamiento general del sistema se supone que es la suma de estos comportamientos promedio. Pero, por supuesto, muchos sistemas no son lineales, y aquí no se puede suponer que la suma total constituye la suma de las partes constitutivas. Este enfoque ha sido criticado, en particular, por las consecuencias en la forma en que se ha considerado a las ciudades – como macro estructuras que originan los cambios urbanos – el cual ya no es admisible.

El resultado ha sido una generación de modelos y metodologías que están divorciados del detalle. Las capacidades de los AC para manejar la dinámica a escala fina con la eficiencia computacional los ha hecho candidatos para una nueva generación de simulaciones detalladas. Esto es una progresión lógica de los esfuerzos de micro simulación en el funcionamiento de los usos del suelo y los modelos de transporte, dando una atención explícita a los detalles espaciales.

Función y forma

Una ventaja importante de los AC es que da la misma importancia a los atributos del espacio, del tiempo y sus atributos. Este enfoque ha beneficiado al modelado en donde un cambio en uno de los elementos tiene profundos efectos sobre los demás. Esto tiene ventajas evidentes para modelar fenómenos geográficos, donde las acciones se entrelazan continuamente en el espacio.

Dinámica

Las generaciones anteriores de los modelos urbanos a veces han tratado mal la dinámica: los modelos se realizaban en "saltos" de una época a otra. A menudo,

estos saltos comprendían varios años - períodos en el que muchas cosas pueden cambiar en una ciudad. La escasa representación de la dinámica era un subproducto de la calibración de los datos de los modelos de corte transversal, a menudo basándose en la información de los Censos, que se producen cada década en la mayoría de los países. Los avances recientes han permitido la calibración de modelos con datos longitudinales, con pasos de tiempo de tan sólo un año.

Sin embargo, los modelos siguen siendo relativamente estáticos. Se actualizan en cada intervalo de tiempo. Los modelos AC representan un avance significativo en el tratamiento del tiempo. Los modelos son esencialmente dinámicos, y lo más importante éstos tienen una interacción dinámica. El tiempo es aún discreto en los modelos AC – es decir que todavía se mueven en 'saltos', pero los saltos pueden ser tan pequeñas, si los datos están disponibles.

Esto es útil para modelar las ciudades: Los AC son lo suficientemente flexibles para permitir múltiples escalas de tiempo que pueden ser representados en la simulación. Esto es importante en los sistemas como las ciudades, donde existen ciclo de vida de distinta duración: por décadas, por años, por mes, por día o por horas. Como los ciclos económicos, los desplazamientos sociales por día o por hora, etc.

La influencia de teoría de la complejidad

El tratamiento de las ciudades como **sistemas complejos adaptativos** es un enfoque innovador para los estudios urbanos. Como hemos visto, muchos de los sistemas urbanos pueden ser considerados como sistemas emergentes en su comportamiento y compleja en su organización. El enfoque de la complejidad se centra en la 'base' del sistema, haciendo hincapié en la interacción entre los elementos, sin sacrificar una perspectiva holística. También se centra en modelos de desarrollo sobre cuestiones importantes tales como las condiciones históricas (el origen), la retroalimentación entre los subsistemas, la interacción, la dinámica, el ruido y las perturbaciones, etc. Por supuesto, los modelos urbanos basados en los AC también ofrecen la posibilidad de aumentar nuestra comprensión de los sistemas complejos adaptativos en general.

Simplicidad

En los modelos basados en los AC, los patrones complejos y los procesos surgen de pocas reglas simples, pero con elementos bien definidos. La simplicidad del enfoque de los AC ofrece muchas ventajas para la simulación urbana. Anteriormente, muchos modelos de los cambios de uso del suelo y de transporte a gran escala, se consideran complicados y difíciles de manejar. En muchos casos los usuarios no entendían cómo los modelos trabajaban. Los modelos fueron considerados como "cajas negras": solo metían datos y recibían datos sin poder conocer qué sucedía dentro del modelo. Ésta era una gran debilidad del modelo ya que el propósito es aprender más sobre cómo funciona un

sistema. Los AC pueden ayudar a dar "color" a la caja negra, en gran parte debido a su simplicidad intuitiva, tanto en términos de la parametrización y la derivación de algoritmos (reglas de transición) para el comportamiento del modelo. El enfoque de los AC en cierta medida tiene aspectos potencialmente confusos en el diseño del modelo – la reglas de transición se derivan (idealmente) de investigaciones teóricas, y la complejidad no están en el diseño o dentro del modelo. Por supuesto, uno siempre corre el riesgo de adoptar un enfoque demasiado simple y omitir detalles importantes en el sistema. Por supuesto, la otra cara de esto es el peligro de que los modelos urbanos basados en los AC puedan llegar a ser demasiado complicados.

La vinculación de los enfoques macro a micro

La ciudad es un sistema complejo con muchos sub-sistemas que operan de forma interactiva en diferentes escalas. Los AC tiene la capacidad de "unir" estos subsistemas de una manera adecuada. Ellos hacen esto al permitir que los patrones a gran escala puedan "salir" de la dinámica interactiva de los elementos locales.

Visualización

Los AC, por su propia naturaleza, son un entorno visual para la simulación. Esto tiene varias ventajas para el modelado urbano. El aspecto visual ayuda a los usuarios a participar en el modelado, los usuarios pueden interactuar visualmente con el modelo. Como dice el refrán, una imagen vale más que mil palabras; los AC puede transportar grandes cantidades de información a la vez. Los procedimientos complejos, los resultados agregados, las tendencias estadísticas y medidas comparativas se pueden presentar visualmente y esquemáticamente. Debido a que los AC son visualmente dinámicos, la evolución del sistema también se puede mostrar cómo cambia con el tiempo.

2.2.3.2. Modificación de AC para aplicaciones urbanas

Los modelos urbanos son una abstracción, versiones simplificadas de los objetos del mundo real y los fenómenos, que son utilizados como laboratorios para explorar ideas acerca de cómo funcionan las cosas en las ciudades. Los AC no son una excepción a esta caracterización. Sin embargo, el autómata celular básico, según la definición de Ulam, von Neumann, Conway, y Wolfram (en Torrens, 2000) no es adecuado para aplicaciones urbanas, el marco es demasiado simplificado para representar a las ciudades reales. Para ser aplicado con éxito a la simulación de los sistemas urbanos, es necesario que los AC sean modificados en la forma en que son parametrizados. De hecho, se necesita una modificación radical antes de que los AC puedan ser aproximaciones de una representación de un sistema urbano. Esto a menudo exige la introducción de componentes adicionales para agregar funcionalidad al diseño básico de los AC. En las siguientes secciones se explican las modificaciones de los AC para sistemas urbanos.

Las células-estado

En el AC básico, el espacio celular es un ambiente cerrado. Los eventos externos no pueden influir en la dinámica del modelo dentro de los AC. Cuando los AC se configuran de esta manera, no hay lugar para las fuerzas independientes que podrían entrar en el modelo en una macro-escala. Naturalmente, los sistemas cerrados tienen poco sentido en el contexto de las ciudades, donde los vínculos y dependencias exógenas son numerosas. Para superar esta limitación, los modelos urbanos basados en AC se han abierto a las influencias externas, por lo general a través de las limitaciones y los algoritmos aplicados a las funciones de transición.

Las células-estado también han sido reformuladas de manera jerárquica en los modelos urbanos basados en AC, reflejo de los modelos de elección discreta en el uso del suelo y la simulación de transporte. Las jerarquías se utilizan para introducir la noción de que la transición del estado en los contextos urbanos (la dinámica de uso del suelo, por ejemplo) tiene una predilección para perseguir las rutas fijas y proceder de una forma secuencial (White y Engelen, 1993). Por ejemplo, los estados binarios de urbanizable o no urbanizable. Un giro especialmente innovador en esta idea es la introducción del concepto de célula-estado (White y Engelen, 1996). Aquí, se hace una distinción entre los estados de células que son "fijos" y los que son "funcionales". En el contexto del uso del suelo, podemos considerar los sitios que generalmente están exentos del proceso de desarrollo urbano (como los cuerpos de agua) como "fijos", los sitios que están activos en el proceso de desarrollo (tales como terrenos baldíos) se puede considerar como "funcionales".

La malla

El AC básico de dos dimensiones se define generalmente en un plano infinito que se estructura en una cuadrícula de mosaicos cuadrados regularmente espaciados, o células. Tanto la idea de un plano espacial infinito y la de un espacio uniforme regular no son realistas para la mayoría de los contextos urbanos. Los AC utilizados para estudiar a las ciudades son a menudo obligados a estar en espacios finitos, con varios trucos (como el uso de buffers) para el tratamiento de los efectos de borde. Los investigadores han experimentado con mallas tridimensionales para modelos urbanos, acercándose a una representación más realista de la dimensionalidad de estos sistemas.

La idea de un espacio celular de estos modelos también es problemático para las aplicaciones urbanas. Muchas de las funciones de las ciudades son regulares: algunas configuraciones de bloque, fachadas de edificios, planes internos de piso, y muchas redes de carreteras. Sin embargo, la mayoría de los objetos en las ciudades no son regulares, y ciertamente no son de forma cuadrada. En un intento por darse un mayor grado de realismo de los modelos urbano basados en AC, los investigadores han introducido una serie de estructuras reticulares irregulares en el marco de los AC.

Los barrios

El formalismo estricto de un AC básico proporciona una especificación muy limitada de los barrios de influencia. En un AC básico, un barrio consiste de una celda individual y un conjunto de celdas adyacentes a cierta distancia de la celda en cuestión. En un AC de dos dimensiones, hay dos configuraciones de barrio: el barrio de Moore, de las ocho células que forman un cuadrado alrededor de una celda, y el barrio de von Neumann de las cuatro celdas directamente adyacentes que forman una cruz en una celda.

Es evidente, que este número limitado de espacios de acción es demasiado restrictivo para los usos urbanos. La rigidez de un AC básico suprime la acción directa de la distancia (aunque la acción se propaga, de manera indirecta). En el mundo urbano, en los barrios la influencia varía de manera significativa y, más a menudo no se adapta a la tipología que ofrece un AC básico. La interacción social, por ejemplo, puede operar entre las propiedades adyacentes, así como a escala de toda la ciudad.

No es de extrañar que los modelos urbanos basados en AC hayan modificado los parámetros de barrio. El efecto de distancia se ha introducido, a menudo como ponderaciones aplicadas a los barrios en los cálculos de transición. Además, los barrios se han ampliado para abarcar grandes espacios. La introducción de las células-estado de los tipos "fijos" y "funcionales" también pueden servir como un sustituto de los barrios asimétricos, las células "fijas" se eliminan en las zonas del barrio para el cálculo de la transición.

El tiempo

El espacio temporal de los AC es también un tema de preocupación para los desarrolladores de modelos urbanos basados en AC. En el marco de un AC básico, el tiempo es discreto y las células evolucionan de forma sincrónica entre intervalos de tiempo. Las disposiciones transitorias se aplican de manera uniforme: todas las celdas se actualizan al mismo tiempo. El equivalente urbano de esta sería una situación en la que todo el mundo en una ciudad está al tanto de cada decisión tomada, con todos los acuerdos que se establecieron al mismo tiempo. Los investigadores que utilizan los AC para aplicaciones urbanas han experimentado con la actualización asincrónica de células. Esto ha sido abordado a través del uso de los agentes en un espacio de AC (Portugali 2000), que añaden un cierto nivel de aleatoriedad en el espacio temporal de la AC. Otros (ver White y Engelen 1993; White y Engelen 1997; White, Engelen y Uljee 1997) han jugado con el proceso de transición de células de estado para que sea sólo en parte secuencial, debido a la dependencia de las limitaciones exógenas.

Las reglas de transición o función de transición

Las reglas de transición son la fuerza motriz detrás de la dinámica de los AC. Las funciones de transición sirven como los algoritmos que codifican el

comportamiento del mundo real en el mundo artificial de los AC. En el contexto urbano de los modelos basados en AC, las reglas de transición son responsables de explicar cómo las ciudades trabajan. No es de extrañar que los modelos basados en AC para estudiar las ciudades hayan tenido cambios radicales en las reglas de transición especificadas en los AC básicos.

Como se ha visto, las reglas de transición se han abierto a los vínculos exógenos, permitiendo a los modelos urbanos basados en AC que funcionen como sistemas casi-abiertos. Además, se han reformulado como expresiones probabilísticas, un cambio de la especificación estricta de estado determinista de un AC básico. De esta manera, las reglas pueden estar condicionadas a una probabilidad, la introducción de un elemento de azar, o "ruido", en el modelo. Además, las reglas probabilísticas pueden depender de otras reglas formuladas en el modelo, lo que refleja la idea de que los sistemas urbanos funcionan como una red de subsistemas co-dependientes y de otros fenómenos. La auto-modificación, una idea no muy diferente de la evolución, se ha utilizado para ampliar la funcionalidad de los AC para fines urbanos. Basado en la idea del algoritmo genético artificial, la función de transición se le permite cambiar a través de mecanismos de retroalimentación. En este sentido, las reglas de "evolución" reaccionan al espacio, se adaptan a medida que progresa la simulación.

La modificación de la regla de transición también ha absorbido otras técnicas de simulación de modelos urbanos, en particular las ideas de la ciencia regional y la econometría. Los principios económicos, tales como la maximización de la utilidad, también se han introducido en las reglas de transición, al igual que los algoritmos de accesibilidad basados en la interacción espacial (White, Engelen y Uljee 1997). Sin embargo, los modelos basados en AC han sido lentos en adoptar explícitamente la teoría geográfica o urbana, como base para la formulación de las reglas de transición, lo que incluiría una sólida base teórica (Torrens et al, 2000).

2.2.3.3. Validación de los modelos urbanos celulares

El tema de la validación del modelo es clave para el desarrollo de todos los modelos urbanos basados en AC, en particular las que se aplican en contextos operacionales. El énfasis hasta ahora ha sido la utilización de técnicas de validación de los patrones: el reconocimiento de patrones, las medidas de comparación, y datos estadísticos. La debilidad de estos enfoques ha sido bien documentada (White, Engelen y Uljee 1997, Wu 1998), y muchos recursos se han gastado para aumentar la capacidad de calibrar los modelos urbanos basados en AC. Sin embargo, gran parte de éste esfuerzo está todavía enfocado a la detección de patrones. Esto ignora el hecho de que los AC comprenden patrones y procesos, formas y funciones. Las investigaciones futuras por lo tanto pueden tener que mirar a las nuevas medidas relacionadas con el proceso de validación.

2.3. Usos del suelo¹⁰

2.3.1. Introducción

Una de las primeras cosas que la gente siempre utiliza para satisfacer sus necesidades es el suelo - para establecerse, para alimentarse, para trabajar, para moverse, para descansar, etc. Estos usos cambian con el tiempo por diversas causas. La relación de las personas con el suelo y el uso que le da tiene su origen con la aparición del mismo hombre en la tierra.

Para explicar el origen de los usos del suelo y sus cambios se han creado diversas teorías, sin embargo, debido a que toda teoría denota o indica conocimiento, la naturaleza y el estado de las teorías difieren entre las distintas posturas epistemológicas – es decir, existen diversos discursos sobre cómo el conocimiento se adquiere, transmite, es alterado y es integrado en los sistemas conceptuales.

Una teoría de cambio de uso del suelo se trata de un conjunto de proposiciones para entender el "qué" del cambio de uso del suelo y el "por qué" de este cambio. Es decir en las teorías del cambio de uso del suelo se describen la estructura de los cambios en los usos del suelo de un tipo a otro y explica por qué se producen estos cambios, las causas de estos cambios, cuáles son los mecanismos del cambio. El "qué" y el "por qué" del cambio de uso del suelo están estrechamente relacionadas a pesar de que en varias teorías existentes rara vez se abordan conjuntamente, haciendo referencia al "qué" o el "por qué".

2.3.2. El suelo, usos del suelo y cambios de usos del suelo

2.3.2.1. El suelo

"**El suelo o tierra** es un área definible de la superficie terrestre, que abarca todos los atributos de la biosfera inmediatamente por encima o por debajo, incluidos el clima, las formas del terreno, la hidrología (incluyendo lagos, ríos, marismas y pantanos), las capas de la superficie sedimentarias y aguas subterráneas, las poblaciones de plantas y animales, el patrón de asentamientos humanos y los resultados físicos de la actividad humana pasada y presente" (FAO 1995, en Briassoulis 2000).

2.3.2.2. Usos del suelo

"**Uso del suelo** implica tanto la manera en que los atributos biofísicos de la tierra son manipulados y la intención que subyace a esa manipulación - la finalidad para la cual se utiliza la tierra" (Turner 1995 en Briassoulis 2000). En el mismo sentido, Meyer (1995) afirma que "el uso del suelo es la forma y el propósito para el cual

¹⁰ En el Anexo A.4 se muestra la clasificación de las principales teorías relacionadas con los cambios de usos de suelo.

los seres humanos utilizan la tierra y sus recursos". Skole (1994) en Briassoulis 2000, va más allá y afirma que "el uso del suelo en sí es el trabajo humano en un tipo de cubierta del suelo, por medio el cual la actividad humana se apropia de los resultados de la producción primaria neta, determinado por un conjunto de factores socio-económicos". Por último, la FAO (1995), en Briassoulis 2000, afirma que "el uso del suelo se refiere a la función o propósito para el cual la población humana local utiliza el suelo y puede definirse como las actividades humanas que están directamente relacionados con el suelo, haciendo uso de sus recursos o que tenga un impacto sobre este."

2.3.2.3. Cambio de usos del suelo

El cambio de uso del suelo puede implicar (a) la **conversión** de un tipo de uso a otro - es decir, cambios en la combinación y el patrón de usos del suelo en un área o (b) la **modificación** de un determinado tipo de uso del suelo. La modificación de un uso particular del suelo pueden implicar cambios en la intensidad de este uso, así como alteraciones de sus características cualitativas y/o atributos, por ejemplo cambiar un área de bajos ingresos a áreas de ingresos altos, los cambios de los bosques de los suburbios de su estado natural para usos recreativos (la superficie del suelo permaneciendo sin cambios), y así sucesivamente. En el caso del suelo agrícola, los cambios pueden ser por la intensificación, la marginación y/o el abandono.

2.3.3. Evolución histórica de las teorías de los usos y cambios de usos del suelo¹¹

2.3.3.1. El Período "pre-industrial" - von Thünen y George Perkins Marsh

Entre los pioneros más conocidos del estudio de los usos del suelo están J.H. von Thünen en Alemania y George Perkins Marsh en los EE.UU. Cada uno se acercó a la misma cuestión desde diferentes perspectivas.

En 1826, el propietario de una finca en Alemania, J.H. von Thünen estudió el problema de cómo determinar la distribución espacial más eficiente de los diversos cultivos y otros usos del suelo en su granja, desarrollando un modelo más general o teoría de cómo los usos del suelo rurales deberían estar dispuestos alrededor de una ciudad, es decir, del mercado. El principio básico era que cada pedazo de suelo debe ser dedicado al uso en el que se daría la más alta renta. Von Thünen consideró la tierra como un recurso económico cuyo principal atributo a considerar fue la productividad y el entorno en el que la actividad agrícola se llevaba a cabo, se consideraba plano y uniforme en todas las direcciones. Su propósito era utilitario para el análisis de los "óptimo" de los patrones de los usos de las tierras. El mecanismo de cambio de uso del suelo está implícito y se puede derivar de los supuestos de la teoría, el único

¹¹ Briassoulis, 2000.

factor variable que influye en la ubicación del uso del suelo y su posible cambio es el valor del producto asociado.

La idea central es que la renta varía con la distancia con respecto al mercado, en un espacio isótropo y aislado, conocida como renta de ubicación. Von Thünen reconoció que el hombre trata de resolver sus necesidades económicas en el entorno inmediato, reduciendo sus desplazamientos al mínimo. Se preguntó por qué los lotes de tierra, con las mismas características físicas tenían diferentes usos. Concluyó que se explicaba por la distancia al mercado. Ver figura 2.3.3.1.

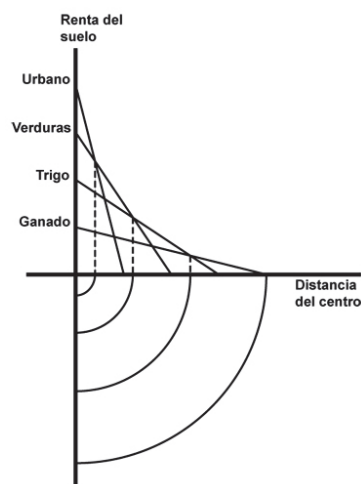


Figura 2.3.3.1. Modelo de Von Thünen. Camagni 2005.

Por otro lado, Marsh, examinó el alcance y la magnitud de los impactos de las acciones humanas sobre el medio ambiente a través de los siglos en varias partes del mundo, en su libro "Hombre y Naturaleza, o, la Tierra modificada por la acción humana" (1864). Este estudio, que principalmente es descriptivo, trató de dar explicaciones sobre las transformaciones ambientales observadas y registradas, así como las visiones opuestas entre el hombre y la naturaleza. El tema de uso del suelo es central (de manera implícita, por lo menos), ya que toda actividad humana tiene lugar en el suelo y modifica el espacio para usos particulares. En las palabras de Kates (1990 en Briassoulis 2000) "La importancia del hombre y la naturaleza no reside tanto en los impactos individuales que realice, es lo que realiza en grupo en un área extensa, es donde se verán los efectos de las acciones a largo plazo". El trabajo fue citado por muchos conservacionistas de su época e influyó en los puntos de vista de las relaciones naturaleza-sociedad.

Los dos enfoques anteriores son diametralmente opuestos para el estudio de los usos del suelo y su cambio. En las décadas que siguieron, una amplia variedad de estudios toman como base estos dos extremos; el legado de von Thünen y el de Marsh marcaron las dos corrientes opuestas de las teorías sobre el suelo, el cambio de uso y sus modelos desarrollados en el siglo XX.

El enfoque económico de Von Thünen, con la ideal del hombre racional, la producción de bienes económicos para su venta en un zona uniforme, estática y ordenada, en donde el cambio de uso de suelo no es el tema central, contribuyó a crear las teorías y modelos de la corriente principal de la economía urbana y regional en el siglo XX.

La visión integral de Marsh de la tierra, el medio ambiente y el papel del hombre que son causantes de los cambios ambientales está en el núcleo de una serie de teorías del tipo naturaleza-sociedad y los modelos integrados propuestos en los años que siguieron y que están muy en boga en el presente.

2.3.3.2. La primera mitad del siglo XX

En las primeras décadas del siglo XX se produjeron cambios significativos en los usos del suelo provocada por la industrialización y la urbanización en el mundo occidental, por no hablar de las dos guerras mundiales y otros grandes eventos socio-económicos y el progreso tecnológico. Estos cambios fueron documentados en estudios de este período y se refieren principalmente a los países o regiones industrializadas, en donde los cambios de los usos del suelo se dieron con mayor rapidez e importancia, como las zonas urbanas en Europa y los EE.UU, entre otras. El rasgo más importante de estos estudios es el establecimiento de un análisis sistemático y "científico" del cambio de uso del suelo sobre bases teorías y modelos procedentes de una gran variedad de campos científicos - sobre todo, la economía, la sociología y la geografía. De hecho, este rasgo es un reflejo de un desarrollo más amplio y general de este período: el surgimiento y desarrollo de los modos dominantes para generar teorías y modelos del suelo y los cambios del uso del suelo, los cuales estaban relacionados con las demás ciencias sociales: economía urbana y regional, la sociología urbana, la geografía económica y social.

En el campo de las ciencias económicas, los conceptos centrales y las teorías que aparecieron en este período se relacionan directa o indirectamente con el estudio del cambio del uso del suelo. **En 1933, Christaller formuló la teoría del lugar central** para ofrecer una explicación teórica de la magnitud y la distribución de los establecimientos de venta al por menor dentro de un área urbana que emplea dos conceptos principales: el "**alcance**" de un bien y el "**umbral**" de un bien. En la década de 1940, **Lösch** (1954) utilizó el marco conceptual de la teoría del lugar central para ofrecer una visión más general de los patrones de los "lugares centrales" en un espacio continuo que se usa para describir otras funciones urbanas, además de la venta al por menor. Extendiendo el nivel de un sistema urbano, la teoría del lugar central representa el tamaño y la distribución de los asentamientos dentro de este sistema. El patrón hexagonal jerárquico de los lugares es la característica distintiva de las versiones de la "**Teoría del Lugar Central**" tanto de **Christaller** como de **Lösch** (y posteriores), ver figura 2.3.3.2. Cabe señalar, sin embargo, que estos teóricos tratan más con la ubicación en el espacio, en lugar de los cambios de los usos del suelo por sí mismos. Otro de los conceptos de la **física social** fue "**la interacción en el espacio**" del ser humano (Stewart, 1947, Zipf 1949 en Briassoulis 2000), ligada a la idea de la

"**accesibilidad**", que se reflejó principalmente en la variabilidad de los costos de transporte desde un punto constante en el espacio. Estos últimos conceptos pusieron los cimientos en la segunda mitad del siglo XX, para el desarrollo de los enfoques teóricos de **interacción espacial y sus modelos**.

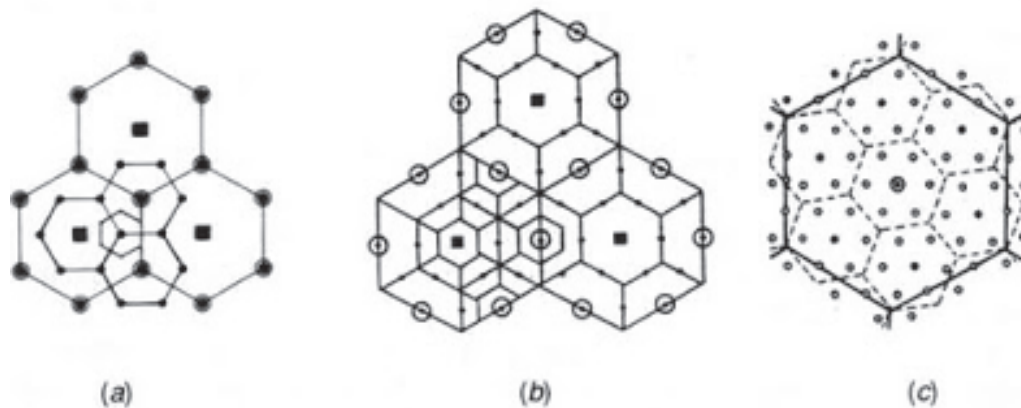


Figura 2.3.3.2. Organización de las áreas de mercado según los principios de Christaller. (a) principio del mercado, con $K=3$; (b) principio del transporte, con $K=4$ y (c) principio administrativo, con $K=7$. Fuentes. Camagni 2005.

En los campos orientados a la sociología-, el desarrollo de la escuela de la "**ecología humana**" por los sociólogos de la **Escuela de Chicago** en la década de 1920 ha tenido el mayor impacto en el análisis de la estructura del uso del suelo y el cambio de las regiones urbanas en este período y subsiguientes (Park 1925, Chorley y Haggett 1967 en Briassoulis 2000). Los principales conceptos de la ecología humana se extraen directamente del campo de la ecología y se utilizan para describir y explicar los patrones físicos observados en una región urbana, así como los procesos económicos y sociales que subyacen en ellas. Entre ellos, las nociones de "**comunidad**", "**competencia**", "**invasión**", "**sucesión**", "**conflicto**", "**equilibrio del clímax**" constituyen conceptos centrales descriptivos y explicativos. Los conceptos usados para describir los patrones urbanos, que habitualmente se mencionan en la mayoría de los textos de los estudios urbanos y regionales y la planificación, son la hipótesis de "**zona concéntrica**" (Park 1925, Romano 1976), la teoría del "**sector radial**" (Hoyt 1939) y el concepto de "**núcleos múltiples**" (McKenzie 1933, Harris y Ullman 1945). En el mismo sentido, la noción de "**ocupación subsiguiente**" fue propuesta para describir la geografía de la zona como "**una sucesión de etapas de ocupación humanos que establece la genética de cada etapa en términos de sus predecesores**" (Whittlesey 1929 en Briassoulis 2000). Los primeros estudios de la ecología humana aparecieron en la primera mitad del siglo XX, lo que marcó el inicio de una larga sucesión de estudios similares realizados en las décadas siguientes.

Los conceptos y las teorías discutidas anteriormente comparten algunas características comunes importantes en el análisis del cambio de los usos del suelo. En primer lugar, la mayoría de ellos son enfoques funcionalistas al estudio de la estructura urbana y regional y su cambio. Buscan "**regularidades repetibles**

y predecibles en las que la forma y la función pueden estar relacionadas" (Bennett y Chorley en Briassoulis 2000). En segundo lugar, algunos **son predominantemente descriptivos** (en su mayoría basados en el enfoque de la ecología humana), mientras que otros son **normativos y prescriptivos** (teoría del lugar central). El suelo y el espacio en general, no tienen propiedades intrínsecas. Los usos del suelo asociados con la población y sus actividades son tratados como si no se extendieran en el espacio, son tratados como puntos en un mapa. Incluso el centro de la ciudad es un punto simple, el centro de un círculo o un hexágono. Se hace hincapié en la ubicación de las actividades humanas en el espacio y en la forma de los patrones de producción - ya sean anillos concéntricos o áreas hexagonales del mercado. Los cambios en los usos del suelo - cuando se trata de un objeto directo de análisis en estos marcos de referencia - son una respuesta mecánica y predecible a los cambios en el costo de la distancia o el transporte, una consecuencia natural del funcionalismo de estos enfoques.

2.3.3.3. La segunda mitad del Siglo XX

El análisis y los estudios científicos del cambio de los usos del suelo crecieron después de la Segunda Guerra Mundial tomando los planteamientos que habían sido formulados con anterioridad. El número y la diversidad de los estudios son grandes y exhaustivos. Incluso una simple enumeración es difícil. Los estudios abarcan toda la gama, desde el nivel local (urbano) a nivel mundial. Los enfoques adoptados se derivan de la economía urbana y regional, sociología urbana y rural, la geografía y la planificación, así como de las ciencias naturales. Además de la mono-disciplinario, una multitud de enfoques interdisciplinarios aparecen sobre todo después de la década de 1970. Por lo que se hará una selección de las categorías más importantes de los estudios, haciendo hincapié en aquellas en las que el cambio de uso del suelo es más o menos el objeto directo de análisis.

La proliferación de los estudios y las inquietudes particulares que se persiguen en el análisis del cambio de uso del suelo no son ajenas a los grandes cambios teóricos y metodológicos en las disciplinas que han contribuido a estos estudios, así como en la tecnología necesaria que los apoya. El más importante de ellos es tal vez la llamada "**revolución cuantitativa**" tanto en la geografía, como en la economía, la sociología y de planificación en los años 1950 y 1960. El progreso en los equipos de cómputo y la tecnología para el procesamiento de datos reforzaron la orientación cuantitativa de los estudios. Estas tecnologías tienen un efecto emancipador para el análisis del cambio de los usos del suelo en el sentido de que facilitan la aplicación de enfoques menos cuantitativos (en el sentido de los años 50 y 60), enfoques más cualitativos y heurísticos ya no son limitados por los supuestos poco realistas que con frecuencia tenían las teorías cuantitativas y los modelos formulados con anterioridad.

Por último, el interés creciente de la política por las consecuencias (negativas) del cambio global ambiental (por ejemplo, el cambio climático) -uno de cuyos componentes son los cambios de los usos del suelo- puede ejercer una influencia sobre la orientación de los estudios en este campo, como los enfoques prácticos

que generen instrumentos de apoyo para la toma de decisiones, dando una guía para la formulación de políticas para el uso sostenible del suelo.

Tres áreas principales de estudio se describirán a continuación. La primera se origina en los campos de conocimiento con orientación **económica**, tales como la economía urbana y regional y los subcampos pertinentes a las ciencias regionales, la geografía y la planificación urbana y regional. La segunda área se basa en los campos de conocimiento con orientación de la **sociología** como la sociología urbana y rural y los subcampos pertinentes a las ciencias regionales, la geografía y la planificación urbana y regional. La tercer área contiene una colección heterogénea de estudios procedentes de los mismos campos mencionados anteriormente, pero teniendo la influencia de las **ciencias naturales** y optando por el análisis integrado de los cambios de usos del suelo.

Los campos de conocimiento con orientación **económica** han generado un gran número de modelos teóricos y estudios empíricos de la estructura espacial urbana y regional en los años de la posguerra.

En términos generales, que se pueden dividir en aquellos relacionados con la estructura espacial urbana e intraurbana y las referidas a las áreas más grandes a escala regional.

La mayoría de los estudios que tienen en cuenta expresamente el cambio de uso del suelo pertenecen al primer grupo, las actividades que se utilizan para analizar el suelo con mayor frecuencia son el residencial y el comercial, y, en menor medida, los servicios públicos y otros.

Una corriente importante de la investigación se basa en la economía neoclásica tomando en cuenta los conceptos espaciales, sobre todo la "fricción del espacio" o "interacción espacial", medida por la distancia entre la ubicación de las actividades.

La teoría urbana de Alonso (1964) sobre el mercado del suelo y su modelo (que toma conceptos del análisis de von Thünen) se considera el estudio de referencia, de la que una serie de modelos económicos de ciudades comparten una característica común: la descripción y explicación de la estructura espacial urbana basada en la renta de la tierra y los costos de transporte y el supuesto de que las personas buscan maximizar sus utilidades.

En la década de 1960 se vio la aplicación de la teoría del lugar central para la ubicación de centros comerciales (Berry 1967 en Briassoulis 2000). Otra corriente importante de los estudios se desarrollaron en la década de 1970 alrededor de las nociones de interacción espacial y la accesibilidad -ya introducidos en la década de 1940 e incluso antes. Esto proporcionó un marco teórico, así como una "familia de modelos de interacción espacial" (Wilson, 1974) para dar cuenta de la ubicación y asignación de actividades en el espacio teniendo en cuenta la red de

transporte. Modelos que integraban el transporte y los usos del suelo también fueron construidos para explicar la relación de los cambios en el uso del suelo y la accesibilidad (Putman 1983, Wegener, 1986 en Briassoulis 2000).

Los análisis con orientación económica de los cambios de usos del suelo comparten varios rasgos comunes, de los más importantes está el énfasis puesto en el mecanismo de precios (costos del suelo y el transporte) como el principal determinante de la localización de las actividades humanas en el espacio. Los análisis son funcionalistas, cuantitativos, a veces muy matemáticos, los planteamientos basados en supuestos son muy restrictivos con respecto a la naturaleza del suelo, el uso del suelo, los cambios de uso del suelo, así como las características y preferencias de los usuarios en el espacio. Tratan de describir (directa o indirectamente) los patrones de uso del suelo y sus cambios, así como decir configuraciones óptimas de uso del suelo que satisfagan los objetivos establecidos.

Los campos de conocimiento orientados a la **sociología** continuaron la tradición de la ecología humana desarrollada en la primera mitad del siglo XX, produciendo estudios cuantitativos y empíricos de la estructura espacial urbana y social, especialmente entre 1960 y 1970. A partir de la teoría y la técnica de análisis del área social y más tarde en las técnicas inductivas más sofisticados de la ecología factorial (Johnston 1994 en Briassoulis 2000), los estudios sobre los usos del suelo y sus cambios se centraron en variables tales como la socioeconómica, la familia, y la condición étnica para dar explicaciones sobre las diferencias observadas en la localización de determinadas actividades - principalmente, las zonas residenciales ocupadas por grupos de diferentes características socio-económicas.

En el ámbito más amplio de la sociología y estudios orientado al cambio de los usos del suelo, dos enfoques particulares se han desarrollado: la conductual y la institucional. Los primeros intentos por describir y explicar los patrones de uso del suelo en función de los factores que influyen en el comportamiento humano y la toma de decisiones, se centra en los sistemas de las actividades humanas (Chapin 1968, Chapin y Kaiser 1979, Korcelli 1982, Johnston 1982, Webber 1964, en Briassoulis 2000). Una variación de este enfoque idealista hace hincapié en las maneras que las personas perciben y experimentan el mundo que les rodea y actúan en consecuencia (Tuan 1975, 1976, 1975 Hugill, Buttimer 1976, en Briassoulis 2000). La segunda (también llamado "radical" o "estructuralista") pone el énfasis en las limitaciones impuestas a la conducta humana por las instituciones de la sociedad en el esfuerzo para explicar los patrones espaciales en las zonas urbanas y de otro tipo. El concepto central de este enfoque es el "poder" económico, y una correlación entre el concepto de "conflicto", por lo general entre desiguales, o el conflicto de clases (Johnston, 1982 en Briassoulis 2000).

Estos últimos enfoques pertenecen a un largo repertorio de enfoques desarrollados en la década de 1970 y más allá de la geografía y la planificación, otras áreas mostraron su interés y fueron muy influenciadas por la teoría social. Se

desarrolló con frecuencia como ataques contra el empirismo y el positivismo que caracteriza la mayoría las descripciones y explicaciones de la estructura espacial y los cambios de uso de suelo de la posguerra, los enfoques alternativos parecían que ofrecían explicaciones de los fenómenos sociales y espaciales con posiciones filosóficas y epistemológicas muy diversas. El materialismo histórico proporciona un marco dentro del cual los patrones de variación espacial y del medio ambiente se explican como el resultado de las relaciones sociales específicas de los modos capitalistas de producción o de otro tipo. Las perspectivas realistas se orientaban hacia la identificación de los mecanismos causales de las estructuras tanto sociales como espaciales, que se producen en determinadas condiciones. El interaccionismo simbólico hizo hincapié en la construcción social de la realidad, el existencialismo hizo hincapié en la centralidad del ser existencial del sujeto humano en el mundo. La etnometodología ha tomado una postura aún más extrema haciendo hincapié en lo único e ideográfico y rechazar cualquier intento de generalización (Jonhston et al. 1994, en Briassoulis 2000).

Una característica sorprendente de todos estos enfoques orientados a la sociología es que se ocupan, de una u otra manera, del espacio, la estructura espacial, las relaciones espaciales y sociales, que tratan con el espacio y los seres humanos que existen dentro de él e interactúan con él de una forma abstracta, es decir, que no hacen referencia explícita de la utilización real del suelo y sus cambios en el contexto de las relaciones causales sociales estudiadas.

Además, con frecuencia carecen de claridad espacial y temporal, incluso cuando se refieren al nivel urbano, regional o internacional y cuando se relacionan con las aplicaciones del mundo real. Además, varios de estos enfoques se aplican a determinados ambientes socio-políticos y culturales, y no se pueden transferir con facilidad sin violar los mismos supuestos en otros contextos. En general, en su forma actual y la orientación que tienen, la información de su análisis del cambio de los usos del suelo es muy poca en términos prácticos.

Además de los enfoques económicos y sociológicos **existen otros enfoques** para el estudio del uso del suelo, que se desarrollaron en la segunda mitad del siglo XX. Se **combinan elementos** tanto de las **ciencias naturales** como de las **ciencias sociales** y que se basan, en general, **sobre la noción de equilibrio ecológico**, que atribuye los cambios en una región a los cambios en la interacción dinámica del conjuntos de cuatro de factores: población, recursos, tecnología y las instituciones (Coccossis 1991, Meyer y Turner, 1996 en Briassoulis 2000).

Los enfoques basados en la teoría de ecosistemas y en los modelos integrados del medio ambiente-sociedad-economía se generalizaron en la segunda mitad del siglo XX y especialmente después de la década de 1970. Su estudio aumentó por la creciente preocupación por el medio ambiente en los círculos políticos y académicos. El uso del suelo y sus cambios llegaron a ser reconocidos como importantes elementos de la naturaleza-sociedad (Slocombe 1993, Lutz 1994, Fischer et al. 1996a, Manning 1988, 1991 en Briassoulis 2000). Lo que distingue a estos enfoques de los dos grupos anteriores es el tratamiento del suelo y del uso

del suelo que se consideran unidos con las variables ambientales (y no sólo económicas o socio-culturales). Por lo tanto, los cambios de los usos del suelo se analizan dentro de un contexto de interacciones naturaleza-sociedad que parece ser más prometedor para el manejo de las políticas y la toma de decisiones para resolver los problemas de una forma más integrada que con los enfoques discutidos anteriormente, centrados en una sola dimensión del tema.

2.3.3.4. El tercer milenio

Al comenzar el nuevo milenio, es natural que se pregunte cuál es el estado actual en el estudio de los cambios de usos del suelo y hacia dónde se dirige o a donde debe dirigirse. En esta sección se da un breve vistazo a la situación actual de las perspectivas, con las teorías, modelos, instrumentos e iniciativas sobre el tema basado en el apartado anterior.

En la última década del segundo milenio, la década de 1990, el estudio de los cambios de usos del suelo podría ser una excepción del informe Brundtland¹² y el movimiento para el desarrollo sostenible. Una preocupación casi universal, con el cambio ambiental mundial había ganado ya terreno y también se había impulsado un gran número de iniciativas de investigación y políticas en todo el mundo, sobre todo después de la Cumbre de Río de 1992.

Como resultado de lo anterior, entre muchos otros, las perspectivas sobre el tema se han ampliado y los métodos más avanzados son más holísticos de lo que eran en el pasado. A pesar de la persistencia y la inercia de los fuertes límites de las disciplinas, nuevas formas de cooperación científica se promueven en el marco de la llamada "transdisciplinariedad".

Se puede reconocer, sin embargo, que muchos de los impactos globales en los cambios de usos del suelo son resultado principalmente de varias decisiones a nivel local de las personas.

Por lo tanto, ha aumentado el interés en la integración - entre las diversas escalas espaciales, desde lo local, regional y global, y los análisis de las zonas urbanas con las zonas rurales.

El análisis integrado es un área poco estudiada en la mayoría de las disciplinas, dando como resultado los problemas de la integración y la síntesis de los marcos teóricos y metodológicos del análisis de diferentes disciplinas.

Sin embargo, parece que los estudios futuros de los cambios de usos del suelo se caracterizan cada vez más, por el uso de enfoques integrados, interdisciplinarios para abordar las cuestiones relacionadas con la gestión del cambio de uso del suelo. Con esto se espera que facilite y genere mayores avances en los sistemas de recopilación de datos.

¹² <http://worldinbalance.net/intagreements/1987-brundtland.php>

2.3.4. Teoría Físico-Social, base de los modelos de los autómatas celulares aplicado a los cambio de usos del suelo¹³

2.3.4.1. Introducción

Los campos de las “Ciencias Urbanas y Regionales” son muy amplios, aunque están dominados por los enfoques teóricos económicos basados en el cambio territorial, contienen una rica variedad de otros enfoques que tratan de describir la estructura y evolución de los sistemas espaciales y, en consecuencia, subyace en el análisis particular del cambio de uso del suelo.

A continuación se explicará la teoría Físico-Social, que es la base de los modelos basados en los autómatas celulares.

2.3.4.2. Teoría Físico-Social

El término **Físico-Social** es usado para denotar una aproximación al estudio de los fenómenos sociales estableciendo analogías con la Física.

Se basa en la noción de "**interacción**" entre los individuos y grupos, teniendo como objetivo explicar la interacción humana sobre la base de las leyes que rigen el movimiento de las partículas en la física.

Su primera codificación se atribuye a Carey (1858), mientras que Ravenstein (1885) aplicó la idea al estudio de la migración, en Briassoulis 2000.

Esta corriente teórica ha servido de base para el modelo gravitatorio. En este contexto, **la magnitud de la interacción entre dos actividades que interactúan, situadas a una distancia d entre sí en el espacio, es proporcional a la "masa" de estas actividades e inversamente proporcional a la distancia entre ellas.** Las "masas" de las actividades son aproximaciones, dependiendo de la actividad considerada. Las medidas de la distancia varían de la distancia física o el tiempo acumulado, en las medidas globales se deben tener en cuenta diversos aspectos de la "fricción del espacio", que suelen reducir la magnitud de la interacción.

Modelo gravitatorio

Según la ley de gravitación universal, dos cuerpos (**a** y **b**) se atraen de forma directamente proporcional al producto de sus masas (**M**) e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa:

$$T_{ab} = K(M_a M_b) / \delta_{ab}^2$$

¹³ Briassoulis, 2000.

donde T mide la intensidad de interacción y K es una constante de proporcionalidad que depende de la unidad de medida adoptada. Con pequeñas variaciones, relacionadas sobre todo con la especificación de la distancia, esta formulación y el correspondiente concepto de interacción gravitatoria han sido utilizados con éxito en el análisis de los fenómenos espaciales.

De hecho, H. G. Carey en Camagni (2005), en sus *Principles of Social Sciences* expresaba la idea de que la zona de influencia de la ciudad fuera proporcional a su población y que dicha influencia fuera disminuyendo a medida que aumentase la distancia. E. G. Ravenstein, en Camagni (2005) nos dice que, partiendo de la hipótesis de atracción espacial y de la observación empírica de los movimientos migratorios en el Reino Unido, formulaba y aplicaba una *law of migration*, y en los años treinta Reilly presentaba una *law of retail gravitation* similar aplicada a los movimientos para realizar compras al detalle.

En general se ha planteado:

$$T_{ab} = K(P_a^\alpha P_b^\beta) / \delta_{ab}^\gamma$$

donde α y β generalmente se ha supuesto iguales a 1 y γ igual a 1 o a 2. El exponente de la distancia γ es la expresión de la impedancia o fricción que el espacio físico ejerce sobre el movimiento y por tanto es variable en función de los fenómenos estudiados. La población P es asumida generalmente como expresión de la masa de las unidades territoriales (en particular de las ciudades); K es estimado econométricamente junto a γ (cuando ésta última no es asumida exógenamente).

El modelo gravitatorio permite expresar de forma sintetizada y ofrecer una medición empírica del principio de interacción espacial, sobre la base de una analogía con la física gravitatoria.

Dos enfoques han permitido fundamentar sobre bases más sólidas el modelo gravitatorio: el enfoque microeconómico basado en el principio de “utilidad individual de los desplazamientos” de Niedercorn y Bechdorf y el enfoque basado en el principio de termodinámica de entropía de Alan Wilson (Camagni 2005).

El principio de individual de los desplazamientos deriva de la teoría de elección del consumidor sobre la decisión de desplazamiento. Es decir las restricciones dadas por un presupuesto que el consumidor destina a sus necesidades de transporte, dicho consumidor buscará maximizar una función de utilidad de los desplazamientos. Niedercorn y Bechdorf hipotizan que dicha utilidad aumenta proporcionalmente con el número de desplazamientos realizados desde el lugar de origen a y que éstos se dirigen hacia los posibles lugares de destino j en proporción al número de personas que allí residen con las cuales es posible realizar un “contacto”.

Modelo de entropía

Propuesto por Alan Wilson a finales de los años setenta, este enfoque permite, al mismo tiempo, obtener de la maximización de la entropía de un sistema espacial una completa familia de modelos de interacción (de los cuales el modelo gravitatorio y el modelo de las oportunidades interpuestas representan formulaciones concretas), dando una sólida base teórica a los modelos antes mencionados.

El principio de entropía rige la dinámica de la degradación de la energía en el campo de la física de los procesos irreversibles alejados del equilibrio. Dicho principio describe el recorrido, orientado temporalmente en una sola dirección de un sistema, sometido a una influencia externa, un recorrido que procede de una situación de "orden" a una situación de "desorden" molecular y por tanto de una condición de baja a una alta probabilidad.

El principio puede ser aplicado al análisis de sistemas formados por un gran número de elementos en los cuales sea relevante conocer no tanto el estado de cada uno de los elementos, sino sólo el número de elementos que se encuentran en un estado concreto, sin importar sus características individuales.

El principio de entropía permite, en una situación de información imperfecta, determinar la condición tendencialmente más probable del sistema, correspondiente a su condición de equilibrio (o de máxima entropía).

Teoría Físico-Social

La teoría de Físico-Social se aplica ampliamente en los modelos de interacción espacial. Se ha aplicado al estudio de los fenómenos urbanos y regionales que implican interacciones, tales como el comercio y la migración.

También puede usarse para explicar y estudiar la estructura espacial urbana y regional, es decir, explicar y estudiar la ubicación de las zonas residenciales y comerciales (u otro uso del suelo) que están vinculados a través de la red de transporte. En este marco, el cambio se produce cuando las "masas" cambian o cuando la "fricción del espacio" que las separa también cambió (debido, por ejemplo, por la mejora de la red de transporte). *Una de las principales objeciones al uso de la física social para el análisis de la estructura espacial urbana y su cambio, se basa en la falta de una justificación económica de las interacciones analizadas.*

El proceso de crecimiento urbano y los patrones resultantes tienen un paralelismo al crecimiento de los organismos (por ejemplo, corales) o de partículas (por ejemplo, las gotas de agua, partículas de óxido de zinc) que lleva a determinados patrones fractales. El concepto de agregación por difusión limitada se aplica al caso de los asentamientos urbanos para simular su crecimiento. La agregación por difusión limitada (*DLA: Diffusion-limited aggregation*) "se refiere a un proceso

por el cual una estructura crece a través de la acumulación o agregación de unidades que se difunden en el espacio hasta llegar a un punto de la periferia de la estructura en la que se 'adhieren' (stick)." (Fotheringham et al. 1989, en Briassoulis 2000).

Varios supuestos del comportamiento se utilizan para "guiar" el proceso DLA que se utiliza como un medio para descubrir el orden que subyace en el caos aparente de la estructura de los asentamientos urbanos. Varios elementos tales como la naturaleza contigua de desarrollo, la naturaleza tentacular del crecimiento urbano, y la presencia de gradientes de densidad se han explorado sobre la base de este enfoque. El marco teórico más ampliamente usado es el **análisis fractal**, que es la base para el desarrollo de modelos basados en **autómatas celulares**. El uso de los conceptos de crecimiento y la estructura fractal para el análisis del crecimiento urbano, al igual que los anteriores conceptos de la física, carece de argumentos teóricos económicos y sociológicos. Los modelos desarrollados sobre la base de estos conceptos pueden replicar los patrones observados y los procesos de crecimiento.

Fractales

Las figuras geométricas regulares no siempre son las más adecuadas para generar formas complejas como las formas de una ciudad o el contorno de un país o de estructuras naturales. La limitación que tienen figuras geométricas regulares es que no son útiles cuando se amplían o cambian de escala, por ejemplo, un arco de círculo se convierte en una recta, la superficie de una esfera se torna más plana. Por ejemplo el contorno irregular de la costa de un país se mantiene prácticamente la misma complejidad a varios niveles de escalas.

“Las nubes no son esferas, las montañas no son conos, las costas no son círculos, la corteza de los árboles no es lisa, ni los relámpagos viajan en una línea recta”
Mandelbrot, en Ortega, 2011.

Una solución para poder representar las formas irregulares de las distintas entidades y que no pierdas sus características a distintas escalas, es a través de los fractales. Un fractal es una forma geométrica que contiene una imagen de sí misma en cada una de sus partes.

El término de fractal fue introducido por primera vez por el matemático Benoît Mandelbrot en 1975 y deriva del latín *fractus* que significa quebrado o fracturado.

Una propiedad particular de los fractales es la autosimilitud, es decir un objeto es autosimilar o autosemejante si sus partes tienen la misma forma o estructura que el todo, aunque pueden presentarse a diferente escala y pueden estar ligeramente deformadas.

Dimensión fractal

Hay que recordar que las dimensiones de líneas, cuadrado y cubos son respectivamente uno, dos y tres. Mandelbrot propone, basado en el trabajo de Hausdorff, que existen dimensiones intermedias entre los valores positivos.

El número de componentes N de un objeto se puede calcular a partir de una escala r y una dimensión D y esta dada por la siguiente ecuación: $N = r^D$

Por ejemplo, para calcular el número de elementos de un cubo ($D = 3$) a escala 1 se tiene: $1^3 = 1$. Para calcular el número de elementos de un cubo ($D = 3$) a escala 3 se tiene: $3^3 = 27$. Para calcular la dimensión D , como dimensión de Hausdorff-Besicovich, la despejamos de la ecuación anterior y nos queda:

$$D = \frac{\log N}{\log r}$$

Con la formula anterior se pueden calcular dimensiones de objetos que no necesariamente tiene que ser enteras, que es lo que sucede con los fractales.

Propiedades de un fractal

A un objeto geométrico fractal se le atribuyen las siguientes características:

- Es demasiado irregular para ser descrito en términos geométricos tradicionales.
- Posee detalles a cualquier escala de observación.
- Es autosimilar (exacta, aproximada o estadísticamente)
- Su dimensión de Hausdorff-Besicovich es estrictamente mayor que su dimensión topológica.
- Se define mediante un simple algoritmo recursivo
- No es diferenciable en ningún punto.

Análisis fractal

Han surgido un gran número de métodos para analizar las propiedades fractales de diversos fenómenos, en donde se investiga, en primer lugar si es un fractal y segundo, en qué medida, es decir a partir del cálculo o análisis de su dimensión fractal.

Algunos métodos de análisis fractal son:

• Conteo de cajas (Box-Counting)	• Autosimilaridad en series temporales o espaciales
• Divisores (métodos de compás)	• Análisis de fluctuación sin tendencia (DFA)
• Relación área-perímetro.	• Análisis de imágenes y textura
• Método "slit island" (SIM)	• Análisis multifractal.

2.4. Modelos para el estudio de los cambios de usos del suelo basados en autómatas celulares¹⁴

2.4.1. Introducción

De acuerdo a la clasificación realizada por Briassoulis (2000), enmarca a los modelos basados en autómatas celulares en los modelos de simulación a nivel regional, que forman parte de los modelos integrados de simulación y de manera global, dentro de los modelos integrados. En esta sección se hará una explicación breve de cada uno de estos tipos de modelos.

2.4.1.1. La necesidad de los modelos basados en autómatas celulares

Los modelos del gas ideal, del fluido perfecto, de la viga de Euler - como tipos de modelos ideales son comunes en la ciencia.

Cada tipo de modelo ideal juega un papel importante en su campo, tanto pedagógico como práctico. Los estudiantes aprenden sobre los tipos de modelos ideales para mejorar su intuición acerca de las relaciones fundamentales entre las variables clave. Pero la realidad no es ideal: los gases reales se apartan sistemáticamente de la ley del gas ideal, los fluidos reales tienen viscosidad, y las vigas reales se doblan en todo tipo de formas que nunca imaginó Euler.

Los agentes racionales son un tipo ideal. Se emplean con el fin de aprender sus principios, por ejemplo, el comportamiento estratégico, los incentivos, las expectativas, los efectos de sustitución, el riesgo moral, la selección adversa. Sin embargo en muchos fenómenos sociales se ha visto que el comportamiento de los agentes es menos racional de lo que se esperaba.

Por lo que es importante generar modelos que se puedan limitar esta racionalidad, para representar mejor la realidad de los fenómenos sociales y urbanos.

En estos modelos, los agentes individuales son representados explícitamente. Estos agentes interactúan directamente entre sí, y una macro-estructura social emerge de estas interacciones.

Una motivación muy común para estos modelos es, a grandes rasgos, una insatisfacción con los agentes racionales. Así, prácticamente todos los modelos basados en AC que han aparecido hasta la fecha implican algún tipo de agente racional acotado o limitado.

¹⁴ En el Anexo A.5 se hace una clasificación los principales modelos de los cambios de usos de suelo.

2.4.1.2. Modelos integrados

Los modelos integrados de los cambio de usos del suelo son tan diversos como el concepto de integración, el cual adquiere diferentes significados en diferentes contextos. Se les llama también modelos globales o generales, aunque el término "integral" ha llegado a dominar la literatura desde la década de 1980. En el contexto actual, los modelos integrados son los modelos que consideran de alguna manera las interacciones, relaciones y vínculos entre dos o más componentes de un sistema espacial - sean tanto los sectores de actividades económicas, las regiones, la sociedad y la economía, el medio ambiente y la economía, y etc. - y ellos se refieren al uso del suelo y sus cambios, ya sea directamente o indirectamente.

El significado de la integración varía con el propósito del modelo y se refleja en la estructura del modelo integrado. Cinco dimensiones de la integración se pueden distinguir en términos generales:

- a) Integración espacial – cuando las interacciones horizontales y/o verticales entre los niveles espaciales se destacan con respecto a un fenómeno que está siendo modelado
- b) Integración sectorial - donde el modelo representa los vínculos y las relaciones entre dos o más sectores de la economía del sistema espacial de interés como el comercio, vivienda, transporte, industria, agricultura, etc.
- c) Integración de los uso del suelo - en el que el modelo da cuenta de las interacciones entre más de dos tipos de uso del suelo, tales como residenciales, comerciales, industrial, transporte, etc., esta dimensión de la integración puede ser equivalente a veces con la integración sectorial
- d) La integración económica-social-ambiental, donde el modelo representa los vínculos entre al menos dos de los varios componentes del sistema espacial, como la economía y el medio ambiente, la economía- sociedad (por ejemplo la población), economía-energía, etc.
- e) Integración de submercados - donde los modelos muestran cómo los diferentes sub-mercados de la economía en su conjunto se relacionan entre sí, un tipo de modelo integración puede tener en cuenta la relación entre la oferta y la demanda. En este último caso, los modelos económicos relacionados se distinguen en el equilibrio parcial (en referencia a la demanda o la oferta) y los modelos de equilibrio general.

Los modelos integrados se pueden agrupar en función de su rasgo más característico (Ver Anexo A.5.). Más específicamente, los grupos de modelos son los siguientes: (a) modelos integrados del tipo econométricos, (b) modelos integrado del tipo de interacción gravitatorios/espaciales, (c) **los modelos de simulación integrados**, y (d) los modelos integrados del tipo entrada/salida. En todos estos modelos, el uso del suelo puede ser tratado directamente por el modelo o los resultados de las implicaciones de los uso de del suelo de los modelos pueden ser evaluados fuera del modelo.

2.4.1.3. Modelos de simulación integrados

Muchos de los modelos integrados de los usos del suelo se pueden clasificar básicamente como modelos de simulación, si la simulación se define principalmente como una actividad de modelado con el objetivo analizar los impactos o para hacer predicciones condicionales usando alguna forma de expresión operativa de los componentes del sistema y de sus interrelaciones.

Batty (1976) aclara aún más el significado de la simulación al distinguir entre los *métodos analíticos de modelación* y los *métodos de simulación*:

Los métodos analíticos de modelación implican el uso del análisis matemático para llegar a ecuaciones explícitas que representa el comportamiento del sistema.

Los métodos de simulación se utilizan para obtener el comportamiento del sistema cuando el sistema es demasiado complejo para ser modelado utilizando el enfoque analítico más directo".

Los modelos de simulación integrados se pueden agrupar de acuerdo con el nivel espacial al que se refieren, ya que existe una estrecha relación entre el nivel espacial de análisis y con los fundamentos teóricos del modelo y el nivel de agregación utilizado (o posible).

Así se pueden tener tres grupos de modelos: (a) modelos de simulación a nivel urbano/metropolitanas, (b) **modelos de simulación a nivel regional**, y (c) los modelos de simulación a nivel global.

2.4.1.4. Modelos de simulación de nivel regional

A nivel de modelos de simulación integrados regionales, se encuentran una mayor diversidad de enfoques y aplicaciones de la simulación del modelo. Incluso la expresión "nivel regional" es algo engañoso en cuanto a la distribución espacial de la cobertura real de los modelos, ya que puede referirse a un conjunto de regiones urbanas, una colección de subdivisiones contiguas de una nación grande, o la nación se considera como un conjunto de regiones (definida de varias maneras), o para un grupo de naciones. Las diferencias más características a nivel regional en los modelos de simulación a nivel urbano están en "la diferencia que se hace del espacio"

Los modelos que se presentan a continuación han sido seleccionados, en primer lugar, porque son representativos de un género más contemporáneo de los modelos de las interacciones de la sociedad y el medio ambiente-economía y, en segundo lugar, porque su finalidad directa es la modelización del cambio de uso del suelo.

Cuatro modelos integrados - o, mejor dicho, enfoques o marcos teóricos - se pueden clasificar como modelos regionales de nivel de simulación y que abordan el análisis del cambio de uso del suelo directamente, son:

- El marco teórico del modelo CLUE (Conversión de Uso del Suelo y sus Efectos – “Conversion of Land Use and its Effects”)
- **El marco teórico del modelos basado en autómatas celulares**
- El modelos del IIASA - LUC (Cambio de Uso del Suelo – “Land Use Change), y
- El modelo IMPEL (Modelo Integrado para Predecir el Cambio de Uso del Suelo Europeo – “Integrated Model to Predict European Land Use”)

2.4.2. Modelos de los cambios de usos de suelo basado en autómatas celulares

2.4.2.1. Modelos y ambientes basados en AC para el crecimiento urbano

Los trabajos más importantes en esta área han sido desarrollados por:

- **Couclelis** (1985): “Cellular worlds: a framework for modeling micro - macro dynamics”.
- **White and Engelen** (1993): “Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns”.
- **Clarke, K., S. Hoppen and L. Gaydos.** (1996): “Methods and Techniques for Rigorous Calibration of a Cellular Automaton Model of Urban Growth”
- **Clarke, K., S.Hoppen and L. Gaydos** (1997): “A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area”
- **WU, Fulong** (1997): “SimLand: a prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rules”
- **Batty, M., Xie, Y., Sun, Z.,** (1999): “Modeling Urban Dynamics Through GIS-Based Cellular Automata”.

Los ambientes de desarrollo integrados más importante son:

- **SLEUTH** (Slope, Land use, Excluded, Urban, Transportation, Hillshade): Proyecto del Servicio Geológico de EE.UU., en colaboración con el Departamento de Geografía de la Universidad de California en Santa Bárbara, basado en el modelo de crecimiento urbano de **Clarke** (UGM: Urban Growth Model, 1997). Uso libre, sin condigo fuente.
- **DINAMICA**: Desarrollado por el Centro de Sensoriamento Remoto del Instituto de Geociencias de la Universidad de Federal de Minas Gerais, Brasil, utilizando algoritmos de transición estocásticos (método probabilístico Bayesiano). Uso libre, sin código fuente.

- **MOLAND (Monitoring Land Use Cover Dynamics)**: Coordinado por el Instituto para el Ambiente y Sustentabilidad de la European Commission's Joint Research Centre. El modelo fue desarrollado por la empresa privada RIKS (Research Institute for Knowledge Systems). Uso restringido.
- **DUEM (Dynamic Urban Evolutionary Model)**: Utiliza el modelo desarrollado por **Batty** et. al. (1999). Uso libre, sin código fuente.
- **IDRISI**: Desarrollado por Clark Labs, integra un modelo de cambios de uso de suelo (Land Change Modeler: LCM) propietario y es comercial.

El modelo de White et al. (1996) se considera como el precursor de la simulación de la dinámica urbana basado en la teoría de los autómatas celulares.

2.4.3. El modelo de los cambios de usos de suelo de Roger White basado en autómatas celulares¹⁵

En el modelo de White, los estados celulares representan los distintos usos del suelo, definidos en un espacio celular finito, que representa la zona de estudio.

Se definen dos clases de estados, los que pueden cambiar, que se utilizan para representar el suelo activo, como el suelo urbano, agrícola, forestal, pastizal, matorral, etc., y los estados que son fijos, utilizados para representar las características que se consideran permanentes, tales como ríos, parques y vías de comunicación (carreteras vía férreas), etc.

Aunque las células fijas del estado no pueden cambiar, éstas pueden afectar las probabilidades de transición de los estados activos, como la cercanía a vialidades. Además de su estado, cada célula se caracteriza también por un conjunto de valores fijos que representan la idoneidad inherente de la celda para cada uno de los usos de suelo activos.

Así, el espacio matricial del autómata celular no es homogéneo en general. Estas idoneidades también juegan un papel en la determinación de los potenciales de transición de una célula. En cada iteración, para cada celda que no esté ocupada por un estado fijo, se calcula un conjunto de potenciales de transición, uno por cada estado que podría en principio convertirse la célula, incluyendo el estado actual de la célula.

Estos potenciales de transición reflejan la aptitud intrínseca de la célula para cada uno de los usos de suelo activos y el efecto agregado de los diferentes usos del suelo de las células vecinas (vecindario de la célula), algunos usos del suelo pueden ser incompatibles como vecinos, otros se refuerzan mutuamente.

¹⁵ White, 1996.

El vecindario utilizado en este modelo es del tipo “Moore¹⁶” extendido, consiste en la propia celda, más las 112 células que se encuentran en un radio de 6 celdas.

Esto es bastante grande en comparación con los barrios de cuatro u ocho células utilizadas en la mayoría de los modelos de AC, lo que permite un modelado más realista de los efectos de la interacción entre los usos del suelo de las células vecinas. Los potenciales de transición también toman en cuenta la idoneidad inherente de la propia célula, y el efecto de una perturbación estocástica.

Las reglas de transición de estado se definen mediante una función que relaciona cuatro tipos de factores:

1. Las conveniencias intrínsecas entre los distintos usos de suelo, las cuales representan inhomogeneidades¹⁷ en el espacio geográfico que está siendo modelado. Estas conveniencias para que un uso de suelo, localizado en un punto específico, se transforme en otro o permanezca sin cambio están relacionadas con cuestiones que van desde la calidad del suelo hasta restricciones legales o presiones económicas especulativas. Es el parámetro s_j en el modelo de White.
2. El efecto que tiene sobre un uso de suelo específico la existencia de distintos usos de suelo aledaños. Este tipo de efecto puede ser atractivo o repulsivo, ya que algunos tipos de suelo atraen a unos y repelen a otros. Por ejemplo, un uso de suelo residencial atrae usos de suelo de tipo comercial en la vecindad, mientras que repele usos de suelo de tipo industrial.
3. El efecto de la accesibilidad local, que representa la facilidad de acceso a las vías de comunicación.
4. Una perturbación estocástica que captura el efecto del conocimiento imperfecto del sistema y las necesidades y gustos variantes entre los actores implícitos, cuyas decisiones repercuten sobre los usos del suelo.

La función sirve para calcular un vector de potenciales de transición para cada celda activa, esto es, aquellas celdas que tienen estados activos. De esta manera se toma el valor mayor de los potenciales calculados. Luego se aplica la regla de transición, esto es, se cambia el estado de cada celda al estado para el cual tiene el más elevado potencial.

¹⁶ <http://mathworld.wolfram.com/MooreNeighborhood.html>

¹⁷ Sistema inhomogéneo: Es aquel cuyas propiedades varían en forma gradual y continúa.

Los potenciales¹⁸ se calculan como sigue:

$$P_{hj} = va_j s_j (1 + \sum_k \sum_i \sum_d m_{kd} I_{id}) + H_j$$

Donde:

P_{hj} es el potencial de transición del estado h al estado j

m_{kd} es un parámetro de peso aplicado a las celdas con estado k y una distancia d a la celda central. Usualmente, las celdas más cercanas a la celda central tienen un peso mayor que las alejadas. Sin embargo, los pesos pueden ser positivos si los estados son compatibles, mientras que se recomienda utilizar valores negativos de los pesos cuando los estados son antagónicos.

$I_{id} = 1$ si el estado de la celda $i = k$, de otro modo $I_{id} = 0$, donde i es el índice de la suma de las celdas situadas dentro de un radio d a la celda central (la función de I_{id} es asegurar que se contabilicen los pesos de las celdas (m_{kd}) localizadas en la posición i, d que tengan el estado k).

H_j es un parámetro inercial, $H_j > 0$ si $j = h$, de otra forma $H_j = 0$ (H_j incrementa la probabilidad de que una celda permanezca en su estado actual).

s_j es la conveniencia del estado de la celda de j , donde $0 \leq s_j \leq 1$.

a_j es el parámetro de accesibilidad, el cual se calcula de la siguiente manera:

$$a_j = (1 + D / \delta_j)^{-1}$$

donde D es la distancia euclidiana medida desde la celda central hasta la celda fija (una celda fija es aquella que tiene estados fijos) más cercanos. δ_j es un coeficiente de accesibilidad, el cual expresa la relevancia que tiene la accesibilidad de la celda para que se dé el uso del suelo j . En este caso si δ_j se acerca a 1 significa que la accesibilidad es muy relevante para el uso de suelo, en nuestro caso, el uso de suelo que se acerca más a 1 es el uso de suelo urbano. D se calcula con la ecuación:

$$D = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

¹⁸ En White, 1996, se define la ecuación para el cálculo de potencialidades.

- v es un término estocástico de perturbación, en donde $v = 1 + (-\ln(r))^\alpha$. En donde α es un parámetro que permite controlar el tamaño de la perturbación. En esta última ecuación r es una variable aleatoria uniforme que varía de 0 a 1.
- k es el índice de la sumatoria que corre sobre los distintos estado (usos de suelo).
- j es el estado inicial de la celda referenciada sobre la que está realizando el cálculo.
- \sum_k es la suma sobre los diferentes tipos de usos de suelos.
- \sum_i es la suma sobre el total del celdas que se considerará.
- \sum_d es la suma entre los diferentes “anillos” que rodean a la celda central.

Como $P_{hj} > 0$, excepto cuando $s_j = 0$, cada célula activa en la matriz tiene una probabilidad distinta de cero de la transición, excepto para el estado prohibido por una adecuación $s_j = 0$. Los coeficientes permiten que las células dentro de un vecindario se ponderen de forma diferente dependiendo de su estado y su distancia de la celda de referencia.

Las células que están más cerca por lo general tienen un mayor peso, pero el peso puede ser positivo si los estados son compatibles, mientras que se recomienda utilizar valores negativos de los pesos cuando los estados son incompatibles. H_j , es un término de inercia y aumenta la probabilidad de que una célula mantendrá en su estado actual. La función de I_{id} es asegurar que se contabilicen los pesos de las celdas (m_{hd}) localizadas en la posición i, d que tengan el estado k .

En la mayoría de las investigaciones que utilizan este modelo, el sistema de comunicación (calles, carreteras, etc.) se representa como un uso del suelo de estado fijo, para unos usos del suelo tiene una acción de atracción (aumenta su posibilidad) o de repulsión (disminuye su posibilidad), de acuerdo a los parámetros de ponderación utilizados en la ecuación o modelo de White.

Una vez que todos los potenciales de transición se calculan, cada célula se convierte en el estado para el que tiene el mayor potencial, que con frecuencia es el estado en el que encuentra.

De la ecuación modelo de White se puede deducir lo siguiente:

Las reglas de transición no solo dependen de los valores de las celdas adyacentes, sino de otros factores externos, modificando los resultados.

Así, la configuración inicial del modelo de White está conformado por:

1. Un espacio celular, que está definido por la zona de estudio.
2. Una configuración inicial de estados, es decir los tipos de uso de suelo.
3. Un conjunto de valores para los parámetros de: (a) Perturbación estocástica, (b) Accesibilidad, (c) Conveniencia y (d) Inercia.

Estos valores los define el usuario, dependiendo de: (a) La experiencia del usuario en la calibración del modelo, (b) el conocimiento de la zona de estudio, (c) por ensayos (prueba y error).

Notas aclaratorias de las variables:

1. Los valores de α van de 0 a 1, cuando se acercan a 0, el comportamiento aleatorio disminuye, desapareciendo con un valor de 0, lo que se interpretaría que todos sabrían el comportamiento del sistema, por lo tanto el sistema sería determinista y con valores cercanos a 1 el ruido estocástico aumenta, y se interpretaría que todos los actores desconocerían el comportamiento del sistema, siendo un sistema totalmente estocástico.
2. $\sum_k()$ Toma los valores correspondientes a los distintos usos de suelo, en este caso, k , corre de 1 a 7, es decir, se definieron 7 tipos de uso de suelo. (urbano, agrícola, forestal, pastizal, matorral, agroforestal y vial). Ver el capítulo 4.
3. $\sum_i()$ Considera el número de celdas en la vecindad con la que se está trabajando, en este caso, es una vecindad del tipo "Moore" con radio de 6, lo que nos da 122 celdas vecinas, lo que i corre de 1 a 122.
4. $\sum_d()$ Es la suma entre los diferentes "anillos" que rodean a la celda central, en este caso son 6 anillos, ya que se toma un radio de 6.

2.5 Conclusiones

Los AC constituyen una herramienta de modelado de evidente utilidad para cualquier disciplina que busque comprender mejor los procesos complejos, la aparición de propiedades emergentes y las relaciones entre el macro-nivel y el nivel individual o micro-nivel, los patrones de conjunto y los individuales.

Los AC permiten poner los principios de la ciencia de la complejidad a la mano y ante los ojos. El estudioso tiene mucho que ganar en la comprensión estructural de esa clase de fenómenos. Nos dan la capacidad de trabajar con sistemas que a partir de reglas simples generan patrones complejos hasta ahora prácticamente inabordables para un gran número de fenómenos sociales.

El modelado y simulación basados en AC, se puede establecer como un marco de experimentación para probar distintos escenarios, en los cuales se pueden ver los efectos que se tendrán si se cambia una o más variables y poder tener distintos escenarios del fenómeno estudiado. Las simulaciones resultantes de un modelo basado en AC, debe ser considerado como una herramienta para la toma de decisiones en la planeación tanto urbana como regional. De acuerdo al estudio que se hizo de las teorías y modelos del cambio de uso de suelo se tiene que:

- El enfoque teórico que explica y apoya la utilización de los autómatas celulares en el modelado de los cambios de uso de suelo es:

El enfoque teórico Físico-Social desarrollado por Reilly 1931, Stewart 1950, Wilson y Bennett 1986 e Isard 1999¹⁹.

- Con la teoría Físico-Social como marco de referencia, se estableció que el modelo a utilizar es el desarrollado por White y Engelen en 1994.

En la siguiente lista se establece la posición del modelo de White, dentro de la jerarquía de los modelos integrados:

- Modelos integrados
 - Modelos integrados de simulación
 - Modelos de simulación a nivel regional
 - **Modelos basados en Autómatas Celulares (White y Engelen, 1994, Engelen, 1995)²⁰**

¹⁹ Ver Anexo A.4

²⁰ Ver Anexo A.5

3. Estudios análogos

3.1. Resumen

En el capítulo dos se definieron a los autómatas celulares (AC), explicando sus características y sus posibles aplicaciones para el modelado y simulación de los fenómenos urbanos en general y en particular su aplicación para predecir el cambio de uso de suelo.

El objetivo del presente capítulo es el mostrar el uso de los AC en escenarios reales, aplicados a distintas ciudades para la predicción del cambio de uso de suelo y crecimiento urbano con el empleo de distintos enfoques y metodologías.

Es importante mostrar que la técnica del modelado y simulación de fenómenos urbanos basados en AC se ha aplicado con éxito, tanto en el extranjero como en México.

El primer caso muestra la aplicación de los AC para la predicción del cambio de uso de suelo, es para la ciudad de Cincinnati, Ohio, en Estados Unidos, utilizando el modelo de White.

Consideramos importante mostrar que el modelo White se ha utilizado con éxito para la modelación y simulación del cambio de uso de suelo en escenarios reales, ya que es el que se va a utilizar para el caso de estudio del presente trabajo.

Además se muestra la metodología utilizada para llevar a caso el estudio y la aplicación del modelo.

El segundo caso que muestra la aplicación de los AC para la predicción del crecimiento urbano y densificación en un escenario real, es en el pueblo de San Miguel Topilejo, Tlalpan, D.F., México.

Es importante mostrar el caso de Topilejo, ya que guarda ciertas similitudes con el caso de estudio del presente trabajo, que es el pueblo de Ajusco, ya que se ubican en la misma delegación de Tlalpan.

3.2. Modelado y simulación de los cambio de usos de suelo en la ciudad de Cincinnati, Ohio, utilizando el modelo de White¹

3.2.1. Antecedentes

La idea es mostrar que el modelo elaborado por Roger White, basado en A.C. se ha utilizado con éxito en un escenario real. Este modelo es capaz de predecir la evolución de los patrones de uso del suelo urbano bajo diversas circunstancias durante el período de estudio hasta un horizonte de planificación.

La zona de estudio es la ciudad de Cincinnati, Ohio. Para este caso se tomaron los datos generados por Passonneau y Warman (1966), los cuales se publicaron los datos de los usos de suelo para 20 ciudades de los E.U. para el año de 1960.

3.2.2. Método de modelación

Se utilizó una malla de 80 x 80 células. Los estados de la célula representan los usos del suelo. Se definen dos clases de estados, los que pueden cambiar, que se utilizaron para representar el suelo activo, como la vivienda, el comercio y la industria, y estados que son fijos, utilizados para representar las características que se consideran permanentes tales como ríos, parques y vías férreas.

El tipo de vecindad utilizado en este modelo consiste en la propia celda, más las 112 células que se encuentran en un radio de 6 celdas. La manera en cómo se calculan las transiciones potenciales para el modelo de White se explicó en el capítulo 2.

En el modelo de White, el sistema de transporte se representa como un uso de suelo de estado fijo, otros usos del suelo son atraídos o repelidos por este, de acuerdo a los parámetros de ponderación empleados en el modelo.

Una vez que todos los estados de transición potenciales se han calculado, cada célula es convertida al estado con mayor potencial – muy frecuentemente es el estado actual.

Para las simulaciones analizadas en este trabajo, el modelo se ejecutó durante 50 iteraciones.

¹White, 1996.

La calibración del modelo de Cincinnati

El modelo se aplicó a la ciudad de Cincinnati, debido a la calidad de sus datos y porque la ciudad tiene otras características que son interesantes desde el punto de vista de los modelos basados en AC, como las limitaciones topográficas y la localización de diversas actividades.

En el modelo se tienen tres tipos de uso del suelo activos o funciones (vivienda, industria y comercio), y tres tipos de uso del suelo fijos (ferrocarril, carretera y el río). Las celdas ocupadas por las funciones fijas (figura 3.2.1) afectan a los estados de transición potenciales de otras células, calculadas por el modelo. La categoría de "industria" incluye un aeropuerto, y la categoría de "vivienda" incluye instituciones, parques y cementerios. El empleo de solo tres tipos de uso de suelo activos no es realista pero para efectos de explorar el potencial de los AC para el modelado de la estructura urbana, el problema no es grave.

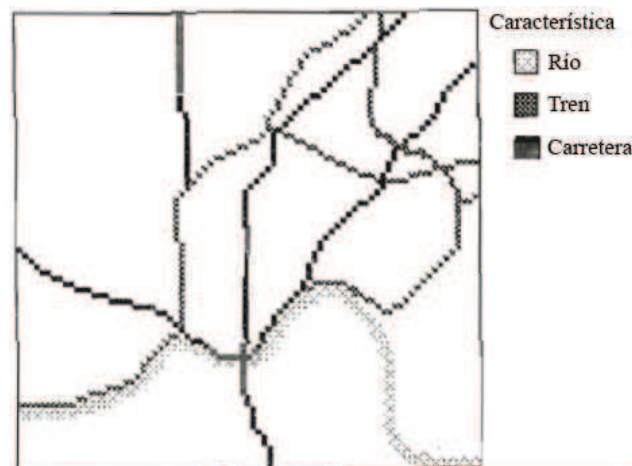


Figura 3.2.1. Sistemas de transportes usados para todas las simulaciones. White 1996.

El modelo se calibró con datos de 1960 de Cincinnati por medio de un enfoque de ensayo y error para modificar valores de los parámetros dentro de los rangos que se consideraron en trabajos anteriores (White y Engelen, 1993c, en White 1996). Para obtener una aproximación razonable de la ciudad real fue relativamente rápida la calibración. Por supuesto, afinar la calibración podría tomar mucho más tiempo. Sin embargo cabe destacar que los valores calibrados de los parámetros de transición, m , son cualitativamente muy similares a los utilizados en las simulaciones genéricas (White y Engelen, 1993c, en White 1996). El proceso de calibración del modelo se simplificaría en gran medida cuando se aplique a otras ciudades.

La pregunta puede ser respondida sólo por la calibración de modelos de diferentes ciudades para ver lo mucho o lo poco que los valores varían de un modelo a otro. Pero no sería sorprendente encontrar un cierto grado de similitud entre las ciudades en este sentido debido a que el conjunto de parámetros de transición calibrado refleja varios principios básicos de localización:

- 1) La atracción y la repulsión de los distintos usos del suelo, debido a factores tales como las economías de aglomeración, la complementariedad, etc.
- 2) Los efectos de la distancia, lo que representa la atenuación (o inversión) de los efectos de atracción y repulsión con la distancia son cada vez mayor, y
- 3) Factores específicos del lugar, tales como la topografía o la zonificación, como se representa en los parámetros de idoneidad.

Por lo tanto el problema de calibración, radica en el establecimiento de los valores de los parámetros de transición m del modelo. Éstos son los parámetros que expresan los efectos de las diversas actividades de uso del suelo en sí.

La tabla 3.2.1 muestra los valores calibrados para replicar las características generales del mapa de los usos de suelo de Cincinnati en 1960. La tabla se divide en tres bloques: el comercio (arriba), la industria (centro), y la vivienda (parte inferior). Cada bloque contiene los parámetros para el cálculo del potencial de una célula para cambiar el uso del suelo en particular.

Hay siete filas de los parámetros de cada bloque, cada fila representa el efecto de un uso particular del suelo. Cada fila muestra cómo afecta al aumentar la distancia para el cambio.

Usos de suelo	Distancia																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Comercio																		
Vacante	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Comercio	98	98	98	98	38	19	-20	-21	-21	-20	-20	-21	-21	-21	-21	-20	-20	-20
Industria	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Vivienda	12	8	7	5	5	4	4	3	2	3	2	2	3	2	3	2	3	2
Ferrocarril	-19	-19	-9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carretera	98	97	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Industria																		
Vacante	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Comercio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Industria	97	98	97	41	15	5	6	5	5	6	7	3	4	0	0	0	0	0
Vivienda	0	0	1	1	2	2	3	4	5	6	7	7	7	7	7	6	6	5
Ferrocarril	60	60	56	49	40	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carretera	56	50	43	35	24	15	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Vivienda																		
Vacante	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2	2	2
Comercio	-20	0	22	21	18	18	16	15	14	13	11	10	8	7	7	5	5	5
Industria	-31	-27	-21	-8	-1	3	4	6	6	6	5	6	6	6	6	6	6	6
Vivienda	34	27	23	21	15	14	11	10	9	7	7	6	4	3	4	3	4	2
Ferrocarril	-21	-21	-12	-7	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carretera	-5	-1	3	3	4	4	4	4	4	3	4	3	3	3	3	3	3	4

Tabla 3.2.1. Parámetros calibrados para la función de transición. White 1996.

3.2.3. La simulación de Cincinnati

Por falta de un plano de los usos del suelo para un período temprano en la historia de Cincinnati, las condiciones iniciales para la simulación se ajustan para reflejar de manera plausible la ubicación y la forma de la ciudad en el siglo XIX [Figura 3.2.2 (a)]. Se utilizó una tasa de crecimiento constante de 1,07, en cada iteración se aplicaba a cada uno de los tres usos del suelo activo. Esta tasa fue elegida para que en la iteración 50 el número de celdas ocupadas por cada uno de los tres tipos de uso del suelo fueran idénticas al número que aparece en el plano de Passonneau y Wurman para 1960. Si la iteración 0 se supone que representan la ciudad real en 1840 en el mapa, ésta correspondería a una tasa de crecimiento en el área urbanizada de 32% en la década de 1960.

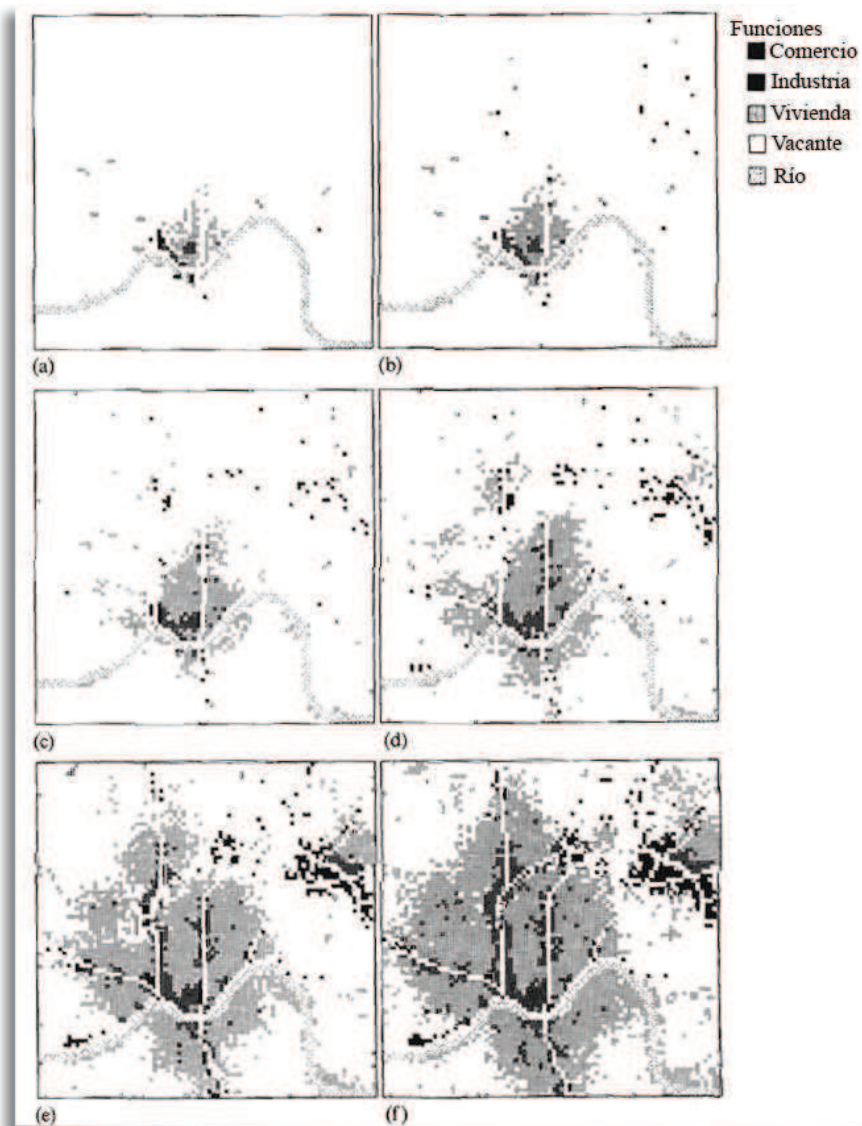


Figura 3.2.2. Seis etapas en una simulación de la ciudad de Cincinnati: iteraciones (a) 0, (b) 10, (c) 20, (d) 30, (e) 43, (f) 45. White 1996.

Se realizaron diversas “corridas” del modelo calibrado, modificando únicamente el factor estocástico o probabilística (α). Una de estas simulaciones se ilustra en la figura 3.2.2., que muestra el estado inicial de la ciudad y las iteraciones 10, 20, 30, 40 y 45 y en la figura 3.2.3. (a) ésta la iteración 50 que muestra el estado final.

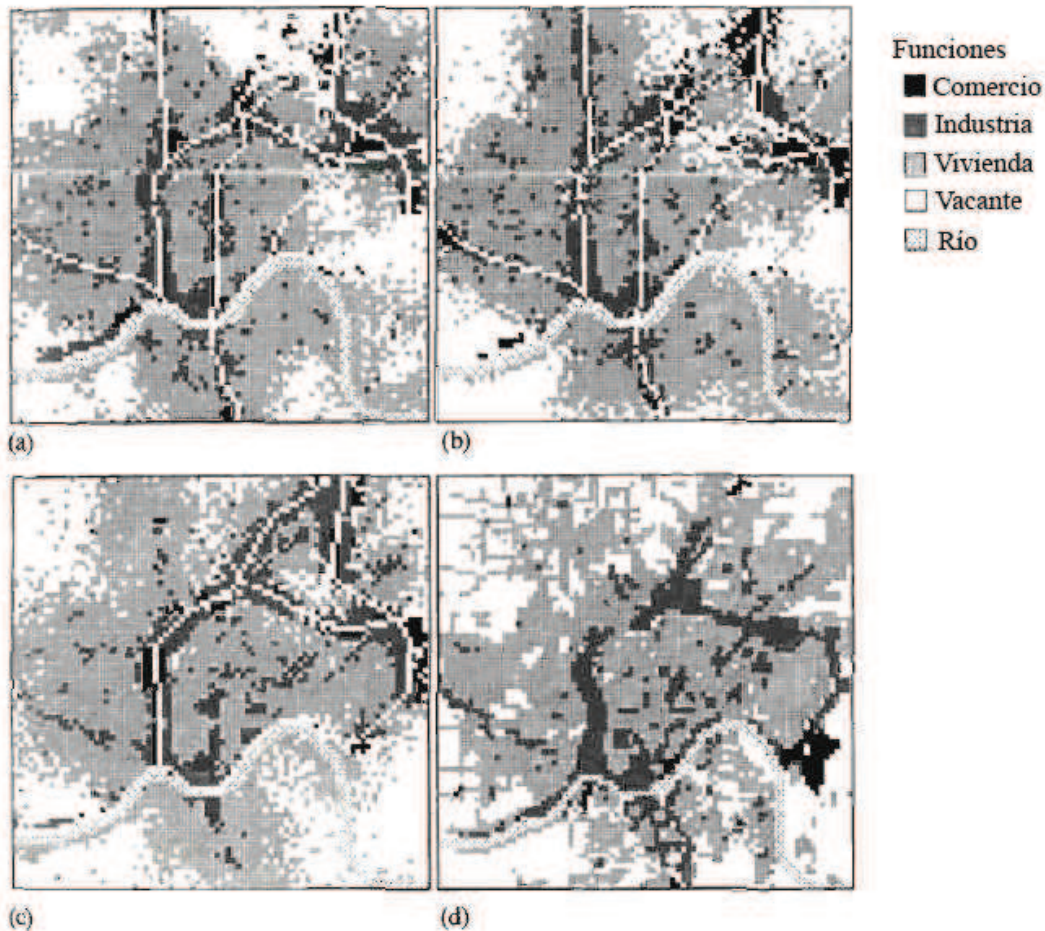


Figura 3.2.3. Las etapas finales de las tres simulaciones en comparación con Cincinnati: (a) iteración 50 de la simulación en la figura 3; (b) la variante de la simulación aleatoria en (a); (c) simulación corriendo con la representación de la red de carreteras; (d) Cincinnati de 1960. White 1996.

Para comparar el modelo, se realizó otra simulación hasta la iteración 50, solo cambiando la semilla que se utilizó para la generación de números aleatorios, que se muestra en la figura 3.2.3. (b). Los dos resultados difieren sólo en detalles locales del uso del suelo (una comparación cuantitativa se muestra en una sección posterior). En general, el desarrollo de la ciudad parece lógico, con el crecimiento más o menos continuo desde el centro de la ciudad, pero con nuevos desarrollos a lo largo de las líneas ferroviarias hacia el norte y noreste por la iteración 30 [figura 3.2.3 (d)] y posteriormente llenándose [figuras 3.2.2 (e) 3.2.2 (f) y 3.2.3 (a)]. El patrón de desarrollo que se muestra en la figura 3.2.2 (d) es muy similar a la que se muestra en el mapa de la ciudad publicado en 1917 (Cincinnati Cámara de Comercio de 1917), que muestra “clusters” industriales a lo largo de las líneas de ferrocarril, junto con áreas asociadas de las viviendas de los obreros.

¿Qué tan buena es la simulación? Para responder a esta pregunta hay que comparar los resultados de la simulación con la ciudad real. Varios enfoques son posibles: (1) una comparación visual de los mapas, (2) una evaluación cuantitativa del grado en que las zonas de uso del suelo en los dos mapas coinciden, y (3) la comparación con medidas más abstractas de los dos mapas, como las medidas de la dimensión fractal. Cada uno de éstos tiene sus ventajas pero también cada uno tiene deficiencias. Mandelbrot (1983) sugiere que para las formas complejas fractales, la comparación visual es la herramienta más poderosa que cualquiera de las técnicas cuantitativas actualmente disponibles.

Siguiendo el consejo de Mandelbrot, la comparación de las simulaciones se muestran en las figuras 3.2.3 (a) y 3.2.3 (b) con la ciudad real, que se muestra en la figura 3.2.3 (d), encontramos que en ambos casos la similitud parece estar muy cerca: los resultados de la simulación con claridad “se parecen” a Cincinnati. Por supuesto que hay discrepancias. Por ejemplo, las viviendas en la zona periférica de Cincinnati están, evidentemente, alineadas a lo largo de la red de calles y carreteras. Este patrón está, por supuesto, ausente en las simulaciones, porque el sistema de carreteras no está en el modelo con el suficiente detalle y ninguna de las simulaciones capta el área principal de uso "industrial" de la tierra situada en el sureste, cerca del río en el mapa de Cincinnati. Pero esa zona es en realidad un aeropuerto, un uso del suelo que se generaría por reglas muy diferentes a las que se incluyen para la industria en el modelo actual. Evidentemente, las actividades que son muy diferentes en términos de los factores de ubicación a la que responden no se pueden agrupar en la misma categoría de uso del suelo sin degradar el rendimiento del modelo.

Es evidente que también sería deseable tener una medida cuantitativa del grado de similitud entre las simulaciones y la ciudad real. Para ello, el enfoque estándar sería evaluar el grado en que los dos mapas de uso del suelo coinciden por medio de una coincidencia de la matriz y los índices k asociados. Este enfoque depende de la comparación de celda por celda de dos mapas para determinar el número de células que tienen estados idénticos en los dos mapas. El segundo método, más preciso pero también mucho más abstracto para medir las formas urbanas son proporcionadas por las dimensiones fractales asociadas a la zona.

3.2.4. El análisis de sensibilidad

Por lo anterior los modelos basados en AC son capaces de generar replicas razonables de la forma urbana, por lo tanto también deben ser capaz de generar predicciones relativamente fiables, a pesar de la aleatoriedad necesaria del sistema urbano. Para determinar el grado de previsibilidad en el modelo para un caso particular se llevará a cabo un análisis de sensibilidad. El análisis de sensibilidad hace uso de las matrices de coincidencia. Es posible utilizar las matrices de coincidencia aquí, porque los mapas que se van a comparar incluyen los mismos usos de suelo y el mismo número de celdas.

En primer lugar, se compararon las dos simulaciones que se muestran en las figuras 3.2.3 (a) y 3.2.3 (b). La matriz de coincidencia se muestra en la tabla 3.2.2 junto con los valores de los índice asociados para los tres usos de de suelo activos. La estadística de K para el comercio, 0.51, está en el extremo superior del rango 'razonable' de acuerdo a la interpretación adoptada en Monserud y Leemans (1992), y los demás valores son "buenos", con 0.69 que es el límite superior del rango "bueno". Cuando la tabla se compara con los mapas en las figuras 3.2.3. (a) y 3.2.3 (b), las limitaciones del enfoque de la matriz de coincidencia son evidentes: la información sobre la situación del uso del suelo en los dos mapas se reduce a la forma binaria de acertar o fallar. Sin embargo, refiriéndose a los mapas es evidente que, para cada uno de los tres usos del suelo, la ubicación general de las células es bastante similar, aunque en el caso de las células individuales del uso particular del suelo se desplaza por una distancia de una o dos células, es decir, los patrones son bastante similares en los dos mapas. (A este respecto, véase también la figura 3.2.6.).

Simulación 2	Simulación 1				
	Vacante	Comercio	Industria	Vivienda	Total
Vacante	1532	8	78	378	1996
Comercio	16	126	10	86	238
Industria	69	13	509	114	705
Vivienda	379	91	108	2262	2840
Total	1196	238	705	2840	5779
Índice K	0.66	0.51	0.69	0.63	0.69

Tabla 3.2.2. Estadísticas de la matriz de coincidencia K para dos simulaciones.
 Nota: el número en la coincidencia de la matriz son los recuentos de células. White 1996.

Sin embargo, estas dos simulaciones representan más de un siglo en la historia de la ciudad, mientras que para la mayoría de las aplicaciones prácticas, un horizonte útil podría ser a lo más del orden de 20 o 25 años, representado por 10 iteraciones en el modelo actual. En consecuencia, para el análisis de sensibilidad, una serie de simulaciones se ejecutaron, las que se muestran el mapa de la figura 3.2.2. (e) (40 iteraciones), tomándose como la configuración inicial.

La ciudad en este momento no ha completado el proceso de urbanización en el área cubierta por la simulación, hay grandes extensiones de terrenos baldíos que habrá que desarrollar. La simulación se ejecuta hacia adelante diez repeticiones con los resultados anotados en las iteraciones de 5 a 10. Tres grupos de cuatro simulaciones se llevaron a cabo, con las simulaciones en cada juego que sólo difieren en la semilla utilizada para el generador de números aleatorios. El primer conjunto emplea los valores de parámetros utilizados para generar el resultado en la figura 3.2.2, con el nivel de aleatoriedad con valor $\alpha = 1.5$. El segundo valor fue idéntico al primero, salvo que no se utilizaron conveniencias, es decir, las especificaciones son las mismas que las utilizadas para generar la Figura 3.2.4. (a). El tercer valor fue idéntico al primero, salvo que el nivel de aleatoriedad se

elevó a $\alpha = 2.0$, produciendo una distribución más dispersa de los usos del suelo - más dispersa de lo que realmente esta Cincinnati. Como hay cuatro corridas en cada valor, hay seis comparaciones de mapa que se pueden hacer para cada valor.

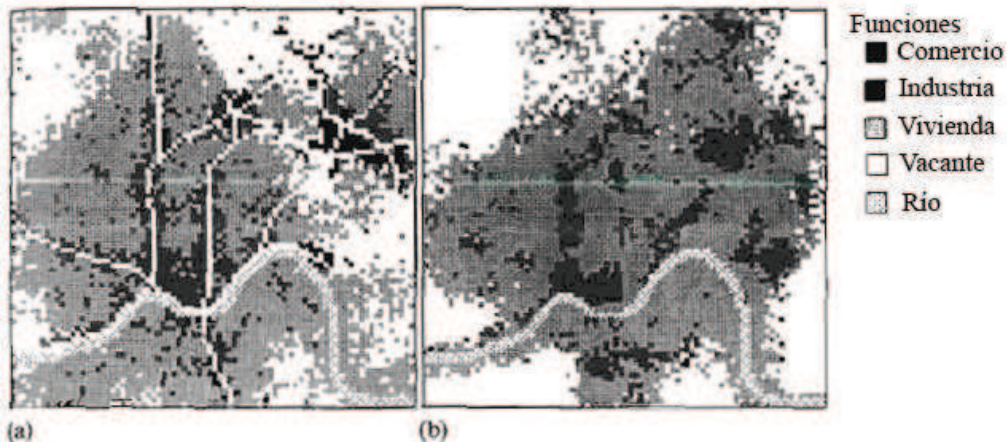


Figura 3.2.4. Efecto de las conveniencias, (a) simulación sin conveniencias, (b) simulación sin ningún sistema de transporte, pero con conveniencias, como se muestra en la figura 3.2.5. White 1996.

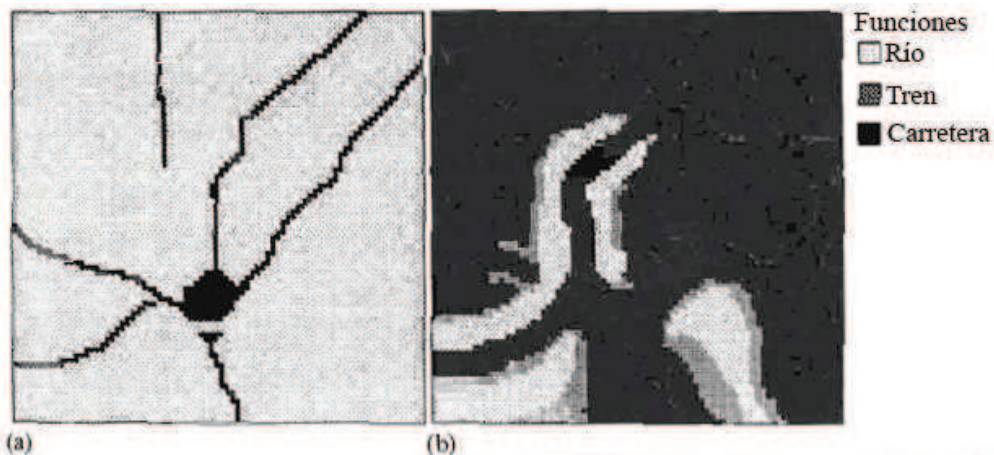


Figura 3.2.5. Idoneidad para representar el sistema de transporte: el comercio (a), industria (b). White 1996.

Para cada par de mapas, una matriz de coincidencia se ha calculado. Sin embargo, estos no se presentan aquí de forma individual. Los resultados se muestran en tabla 3.2.3, siendo un promedio de las seis posibles comparaciones. Los resultados son muy precisos para el comercio y la industria, ya que debido al factor de inercia y otras limitaciones no se convierten en otros usos de suelo. Para la vivienda, sin embargo, éste no es el caso, por lo que las proporciones se muestran en la tabla 3.2.3., para éste uso del suelo puede tener pequeños errores, del orden de 0.02 o menos.

	Comercio	Industria	Vivienda
$\alpha = 1.5$			
Iteración 5	0.11	0.33	0.49
Iteración 10	0.20	0.52	0.64
$\alpha = 1.5$ sin conveniencias			
Iteración 5	0.12	0.24	0.44
Iteración 10	0.22	0.38	0.59
$\alpha = 2.0$			
Iteración 5	0.08	0.19	0.29
Iteración 10	0.16	0.36	0.48
Número de celdas sumadas			
Iteración 5	46	168	714
Iteración 10	137	391	1608

Tabla 3.2.3. La similitud de los resultados de la simulación. White 1996.
 Nota: α es el nivel de aleatoriedad

El grado de aleatoriedad se mantuvo constante a $\alpha = 1.5$, el grado de previsibilidad de la forma de la ciudad es mayor cuando la forma de la ciudad se ve limitada por conveniencias que cuando no lo es; y cuando el grado de aleatoriedad se incrementa a $\alpha = 2.0$, la previsibilidad del sistema cae en un 25%. En otros aspectos, sin embargo, los resultados son tal vez más sorprendentes. En primer lugar, el grado de previsibilidad en el corto plazo parece ser más bien baja. En el peor de los casos, sólo del 8% al 12% de las células de comercio, en promedio, coinciden en un par de simulaciones en la iteración 5. (Los valores reales de los seis casos que se utilizan para calcular el valor medio de 0,11 se muestra en la primera fila de la tabla con rango de 0,04 a 0,17). Sin embargo, para la iteración 10, la previsibilidad ha aumentado considerablemente, de modo que en el caso del modelo de simulación estándar, por ejemplo, los niveles promedio de coincidencia entre los pares de simulaciones son un 20% para el comercio, el 52% para la industria, y 64% para la vivienda. (Los valores reales utilizados para calcular la media de 0,64 para el rango de la vivienda sólo van del 0,63 a 0,65).

Por otra parte, el hecho de que el grado de previsibilidad, medida aquí aumenta sustancialmente a medida que la duración del período de pronóstico se duplica es principalmente una indicación de que el grado de coincidencia no es enteramente satisfactorio como una medida de la previsibilidad. Como ya hemos señalado, la matriz de coincidencia no tiene en cuenta el patrón de localización de usos del suelo y que es la fuente de los aumentos de previsibilidad medida. Más concretamente, el fenómeno se presenta de la siguiente manera. El sistema de simulación parece ser muy limitada. Así, por ejemplo, cuando una célula de vivienda se va a agregar, las conveniencias junto con el modelo actual de uso del suelo pueden limitar la posible ubicación de una región muy pequeña, la perturbación aleatoria sólo puede desviar la elección de una célula a otra dentro de esta región.

Para las dos simulaciones, en las iteraciones anteriores, cuando relativamente pocas células de vivienda han sido agregadas, la perturbación aleatoria puede dirigir la nueva celda a diferentes lugares en las dos simulaciones, por lo que el porcentaje de coincidencia sigue siendo baja a pesar de que en ambos casos, la célula puede estar dentro de la región probable.

Pero a medida que las simulaciones prosiguen, y la región probable comienza a llenarse, la proporción de coincidencia de los lugares de las células debe ir aumentando. Finalmente, por supuesto, si la simulación se extendió por más iteraciones, el grado de previsibilidad llega a un máximo y luego comienza a caer para cualquier medida que se utilizó.

Tal vez la mejor indicación de la similitud de los resultados de las dos simulaciones la da la comparación visual de los mapas finales. Una comparación tal se muestra en la Figura 3.2.6. Las formas urbanas generadas por las dos simulaciones, en general son bastante similares.

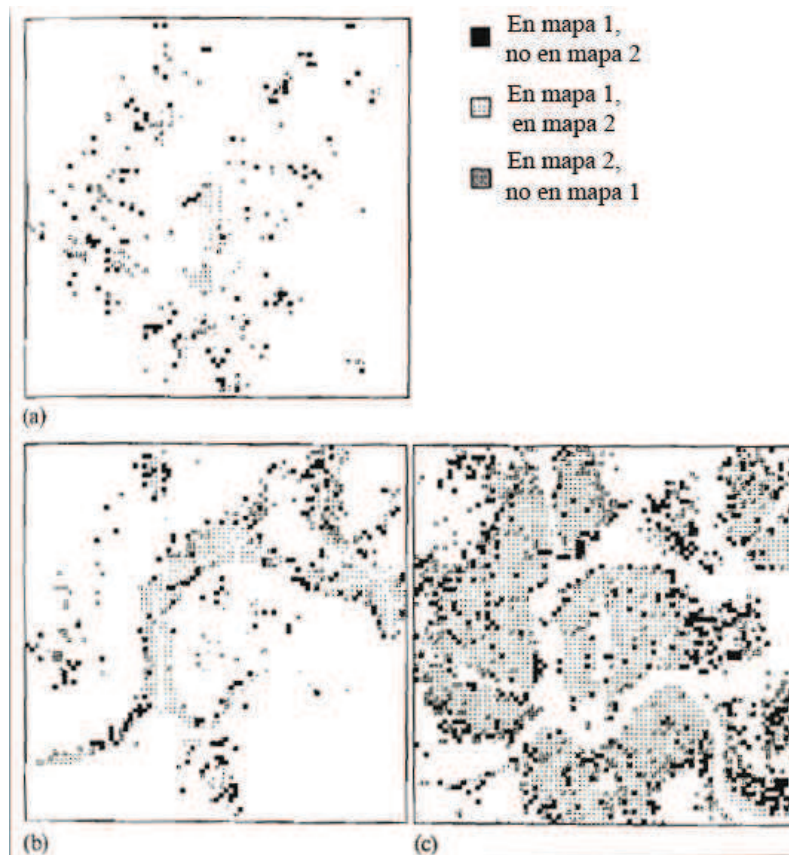


Figura 3.2.6. Comparación de dos simulaciones con diferentes valores de α , (a) el comercio; (b) la industria; (c) de la vivienda. White 1996.

En particular, las células en las dos simulaciones que no coinciden, están por lo general en lugares muy similares, especialmente en el caso de las células de la industria y la vivienda.

Hay que tener en cuenta que la categoría "en el mapa 1 y en el mapa 2" incluye las células que estaban presentes en el mapa en las condiciones iniciales, un mapa que es común a las dos simulaciones. Una muestra más útil es aquella que sintetiza los resultados de un gran número de simulaciones en la forma de un mapa que muestra la proporción de veces que una célula dada termina en un estado en particular. En estos mapas de probabilidad de uso del suelo, las áreas relativamente predecibles e impredecibles de la ciudad son fácilmente identificables.

3.2.5. Resultados alcanzados

Los resultados de las diferentes simulaciones de Cincinnati, junto con el análisis de sensibilidad, sugieren que los modelos basados en autómatas celulares pueden dar una representación razonable de la dinámica urbana, incorporando un alto grado de detalles espaciales.

Por otra parte, tal parece que los factores como la red de transporte, las características del sitio, como colinas, ríos y parques, y el patrón actual de los usos de suelo que se utiliza, todos actúan para restringir en lo posible el patrón de desarrollo urbano, por lo que, a pesar de la aleatoriedad inherente del sistema es posible hacer predicciones relativamente fiables y reproducibles de los patrones de uso del suelo urbano. Por tanto, es razonable imaginar que los modelos basados en autómatas celulares un poco más elaborados, desarrollados sobre una malla más grande para una resolución más fina, con una docena o más de los tipos de uso del suelo, y calibrados con datos que abarquen una década o más, podría servir de base como herramienta para una previsión útil para la planificación.

Si el análisis de sensibilidad del actual modelo con diez iteraciones que representan aproximadamente 25 años, el periodo de predicción sería útil a largo plazo. Este modelo podría ser utilizado por los planificadores para explorar los posibles impactos del desarrollo y opciones de planificación.

Sería conveniente vincular el modelo del AC a un SIG, porque es muy probable que los datos reales necesarios para alimentar al modelo ya estén disponibles en un SIG. Por otra parte, los SIG están diseñados para procesar datos espaciales para producir indicadores compuestos como los utilizados en el modelo del AC. La vinculación del modelo del AC a un SIG facilita en gran medida el proceso de simulación de ciudades reales donde los datos necesarios ya están disponibles en un SIG y la salida del modelo del AC podría ser devuelto en un formato de SIG para su posterior manipulación y almacenamiento. Un modelo de AC de la dinámica urbana, puede verse como la adición de una capacidad de predicción dinámica para un SIG. La vinculación entre un AC (raster) y un SIG (vectorial) es: (1) con las herramientas de conversión entre formatos y (2) existen SIG que pueden manipular tanto formatos raster como vectorial, en distintas capas.

3.3. Modelado y simulación del crecimiento y densificación del Pueblo de San Miguel Topilejo, Tlalpan, D.F. utilizando un modelo evolutivo²

3.3.1. Antecedentes

Este es el segundo ejemplo de la aplicación de los A.C. en escenarios reales. En este trabajo se tenía como objetivo el poder contestar dos preguntas. La primera es: ¿Cuánto tiempo tardará una zona dada en estar totalmente ocupada por el humano?, y la segunda es: ¿Cuál será la dirección de crecimiento de un poblado? Se utilizó como medio de modelación y simulación a los autómatas celulares y como método de calibración se utilizó un algoritmo evolutivo, para poder contestar las preguntas anteriores.

La zona de estudio fue el pueblo de San Miguel Topilejo, el cual está ubicado en la delegación de Tlalpan. El periodo de estudio fue de 1995 a 2002. El pueblo de San Miguel Topilejo se ubica en suelo de conservación. En esta zona predominan las tierras de cultivo y los bosques, es una zona estratégica para la recarga del manto acuífero de la ciudad de México. El pueblo está dividido por la autopista de cuota que va hacia Cuernavaca, y su desarrollo es de particular interés, puesto que el “suelo de conservación” que abarca gran parte del sur del Distrito Federal está en riesgo por el crecimiento de asentamientos irregulares en las cercanías del pueblo. En la figura 3.3.1, se muestra la imagen de la zona de estudio del pueblo de San Miguel Topilejo en 1994.

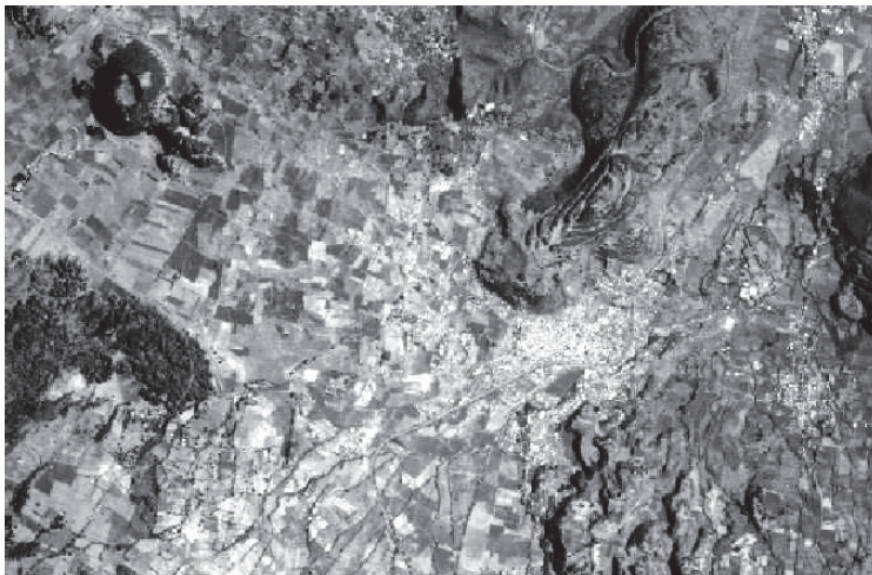


Figura 3.3.1. Fotografía aérea de San Miguel Topilejo en 1994. Serrano 2006.

² Serrano Candela, Fidel, 2006, “Simulación de un sistema urbano usando autómatas celulares”, Facultad de Ciencias, UNAM, Tesis.

3.3.2. Método de modelación y simulación

Se implementó un modelo basado en autómatas celulares para simular el crecimiento y densificación del pueblo de San Miguel Topilejo y se utilizó un algoritmo evolutivo para la calibración del autómata celular.

Estados del Autómata Celular

Se definieron los valores de los estados que pueden tomar los autómatas celulares.

Tabla 3.3.1. Los posibles de los estados de las celdas de los autómatas celulares y sus valores correspondientes.

Estado de la celda	Valor asignado
Despoblado	0
Levemente construido	1
Medianamente construido	10
Densamente construido	100

Tabla 3.1.1. Estados posibles de las celdas de los A.C. Serrano 2006.

Los valores fueron definidos de diferente orden de magnitud para facilitar la caracterización de las reglas de transición, además las reglas de transición deben respetar la restricción de que las celdas se pueblan de forma paulatina, es decir, que una celda en estado de despoblado con valor 0, no puede pasar a un estado medianamente construido con valor 10 o a un estado densamente construido con valor 100 en un solo paso, ni un estado con valor 100 cambiar a un estado con valor 0.

Reglas de transición

El autómata celular no es puro, ya que las reglas de transición no sólo dependen del valor de las celdas vecinas, sino también de factores geográficos y de comunicación. Estos factores son los siguientes:

- Distancia a las vías de comunicación,
- Pendiente del terreno,
- Uso de suelo (agrícola o bosque),
- Distancia a la mancha urbana.

Se escogieron estos factores por la disponibilidad de los datos. Su inclusión en las reglas de transición determina qué parámetros servirán para calibrar el modelo.

El tipo de vecindad es en forma de cruz de dos cuadros de radio.

Las reglas de transición de estado son una mezcla entre interacción local y modificadores globales, por ejemplo para pasar del estado 0 al 1 hay tres posibles mecanismos, difusión por vecindad, dispersión por las vías de comunicación y expansión por densidad, la figura 3.3.2 muestra el diagrama de flujo que implementa estos tres mecanismos.

Ya establecidos los mecanismos de transición se agregó una función aleatoria para permitir o no que una celda cambie de valor. Esto trata de representar la imposibilidad de saber los deseos o motivaciones particulares de cada persona, familia o empresa.

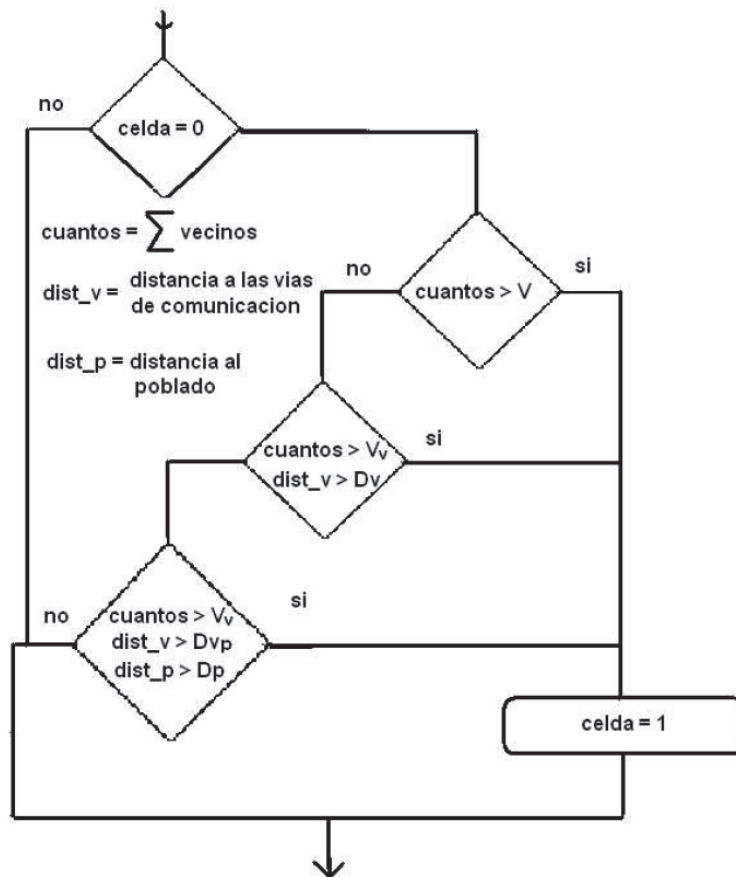


Figura 3.3.2. Diagrama de flujo para las reglas de transición. Los valores de V , D_v , V_v , D_{v_p} y D_p son los parámetros que permiten ajustar el modelo. Serrano 2006.

Índice de similitud morfológica

El índice de similitud morfológica permite medir la "cercanía" entre un resultado dado y el resultado esperado, lo cual sirve como herramienta para ajustar lo mejor posible al sistema real que se está modelando.

Es decir con el índice de similitud es posible comparar dos imágenes y cuantificar su similitud.

El calibrador

Para hacer posible la calibración del autómata celular se desarrolló un algoritmo evolutivo que consta de generaciones de 8 individuos con 7 parámetros cada uno, cada nueva generación está formada por los dos mejores de la generación anterior, cuatro hijos directos de esos primeros dos y dos mutaciones, para un total de ocho individuos. En la figura 3.3.3 se muestra un esquema del ciclo del calibrador.

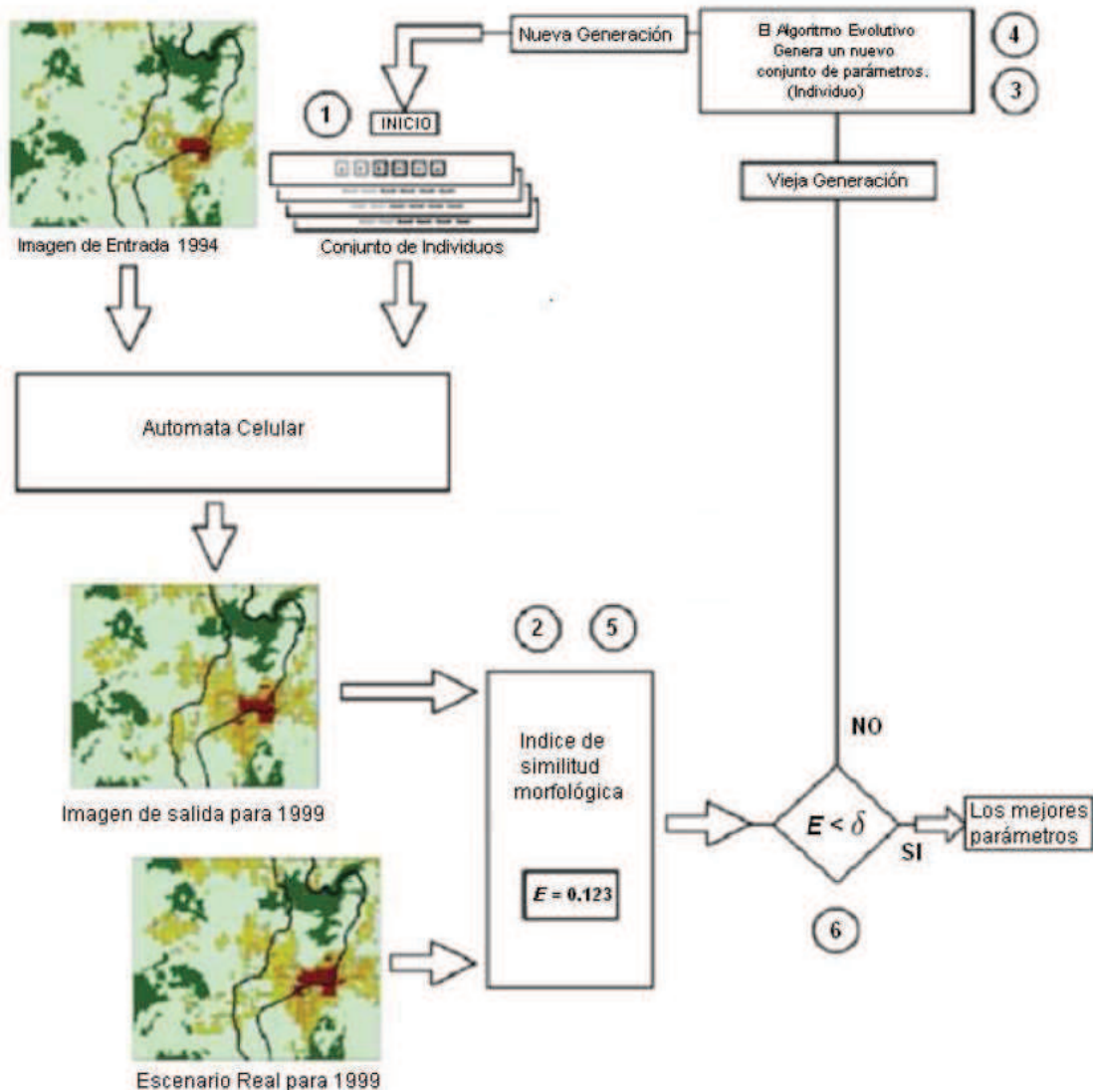


Figura 3.3.3. Esquema del ciclo calibrador, que evoluciona los parámetros del autómata celular. Serrano 2006.

3.3.3. La simulación de Topilejo

El trabajo de clasificación se hizo a mano, a partir de ortofotos de 1994, 1999 y 2002 de San Miguel Topilejo y sus alrededores. Se utilizó una retícula cuadrada de 100x100 m. En las figuras 3.3.4, 3.3.5 y 3.3.6 se muestra el resultado de esta clasificación, para los años de 1994, 1999 y 2002 respectivamente.

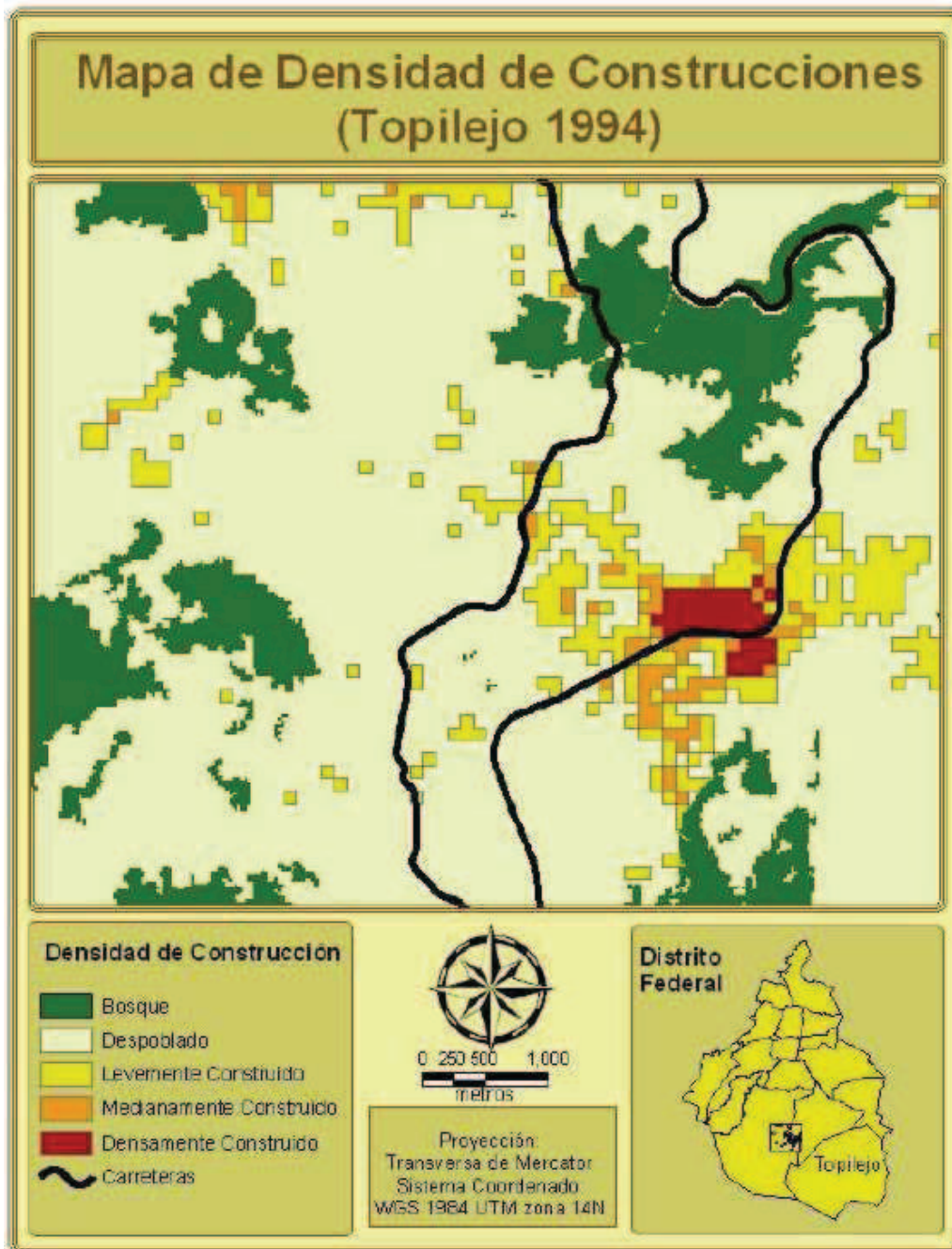


Figura 3.3.4. Mapa de densidades de construcción en Topilejo en el año de 1994. Serrano 2006.

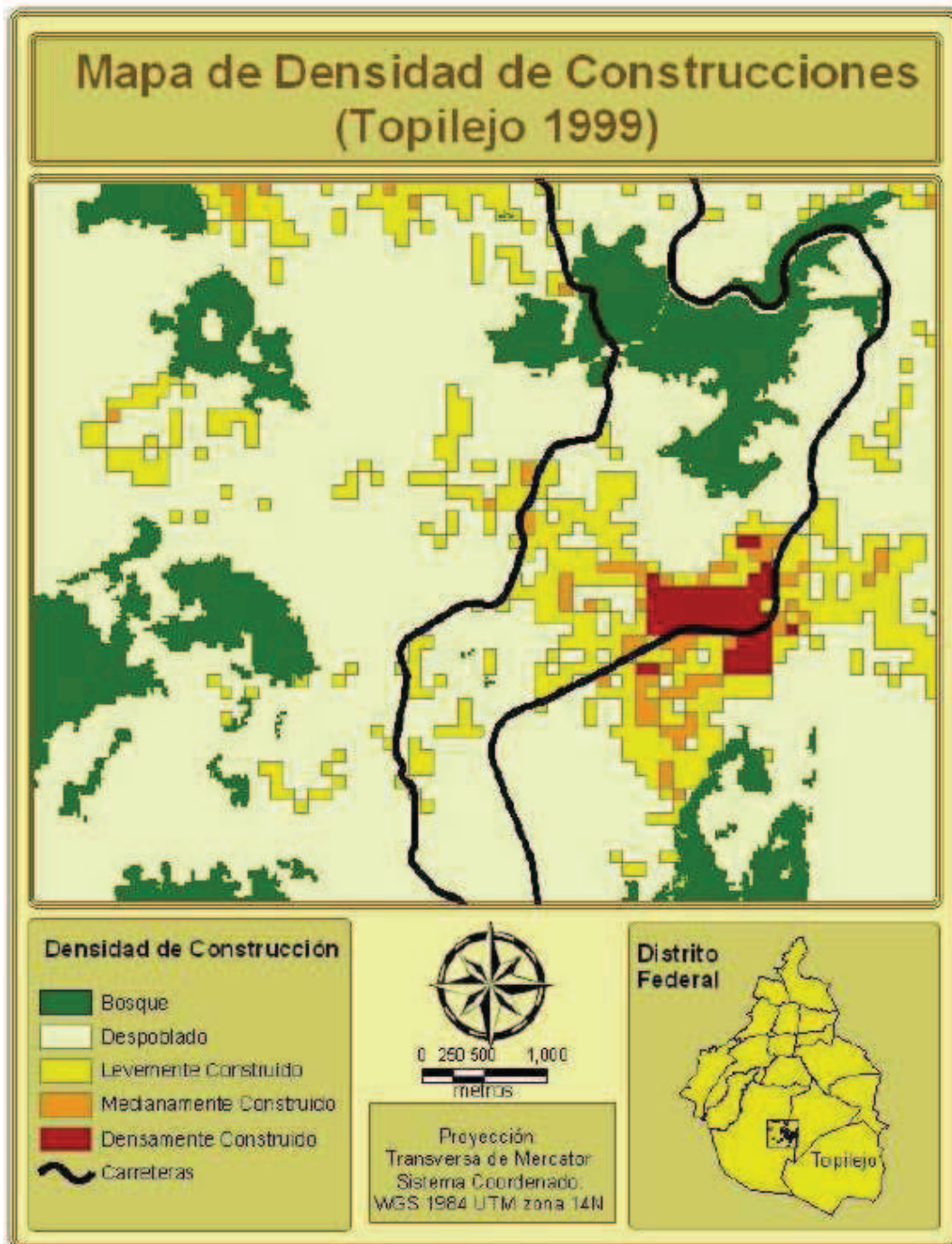


Figura 3.3.5. Mapa de densidades de construcción en Topilejo en el año de 1999. Serrano 2006.

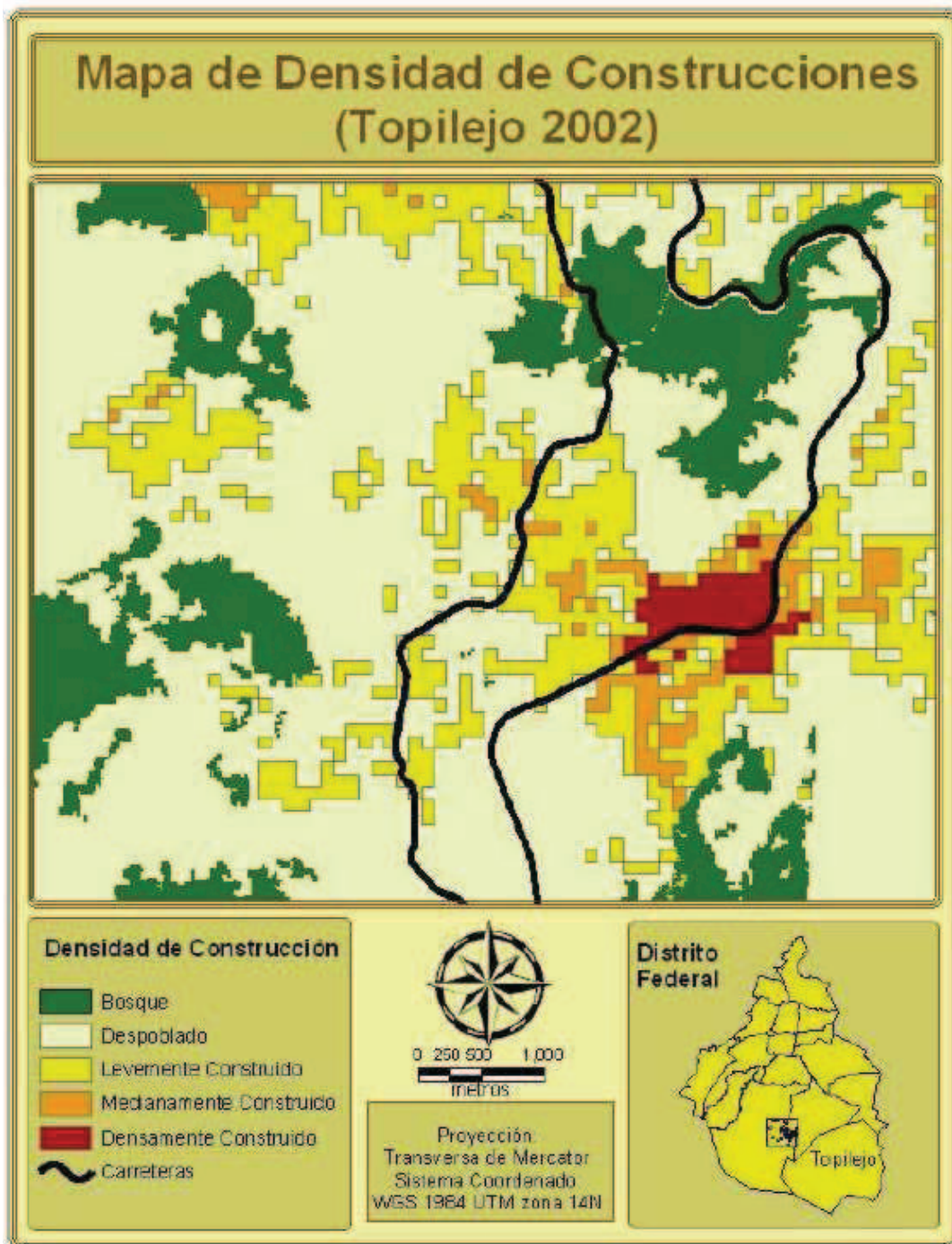


Figura 3.3.6. Mapa de densidades de construcción en Topilejo en el año de 2002. Serrano 2006.

Se ajustaron las vías principales a partir de archivos shapefile.

Las áreas cubiertas de bosques y pastizales también se hicieron a mano a partir de las ortofotos, esto se puede apreciar en la figura 3.3.7.

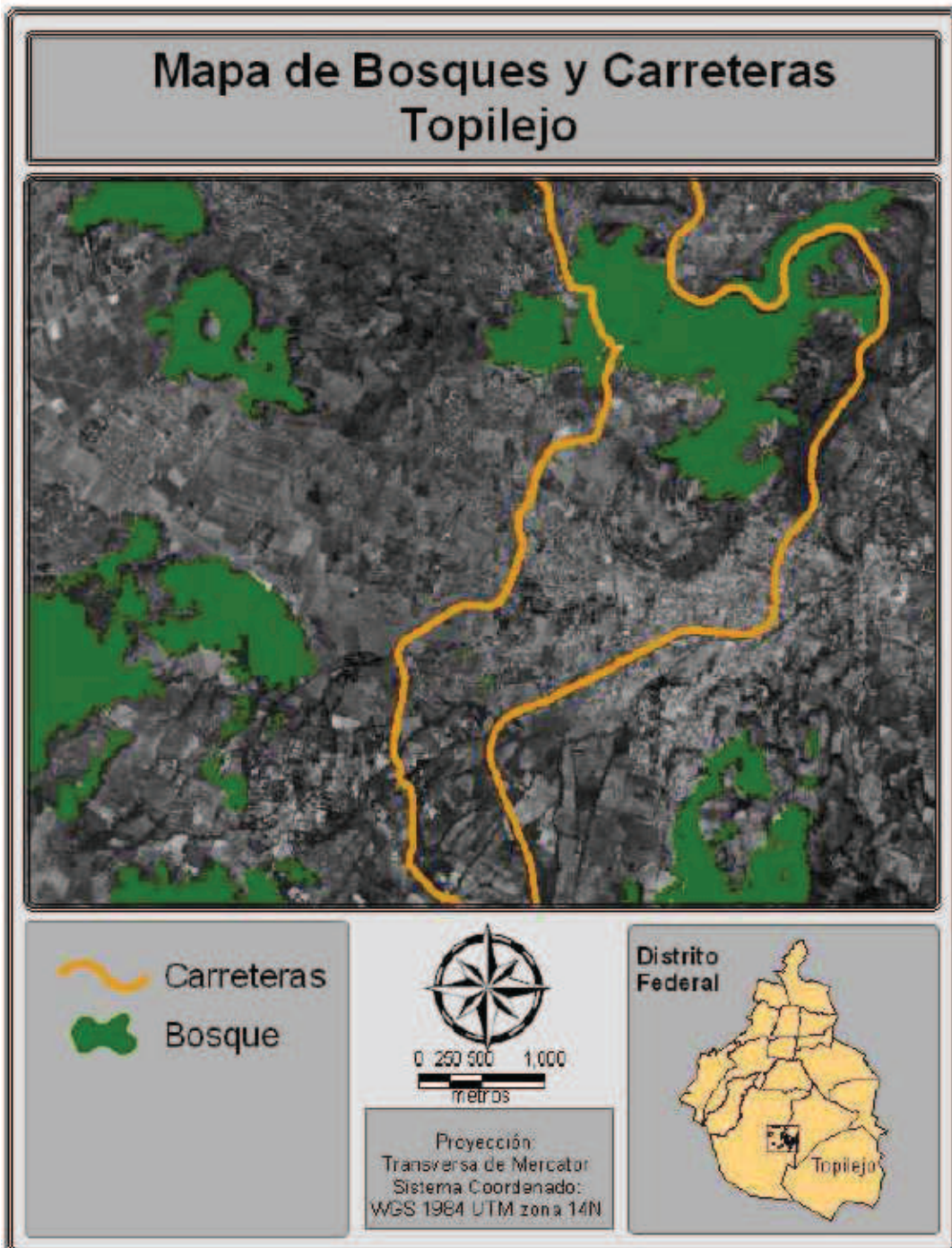


Figura 3.3.7. Mapa de bosques de la zona de Topilejo. Serrano 2006.

Por último la pendiente para cada punto se generó a partir de las curvas de nivel mediante un algoritmo de interpolación que provee arc-info, el resultado de éste puede observarse en la figura 3.3.8.

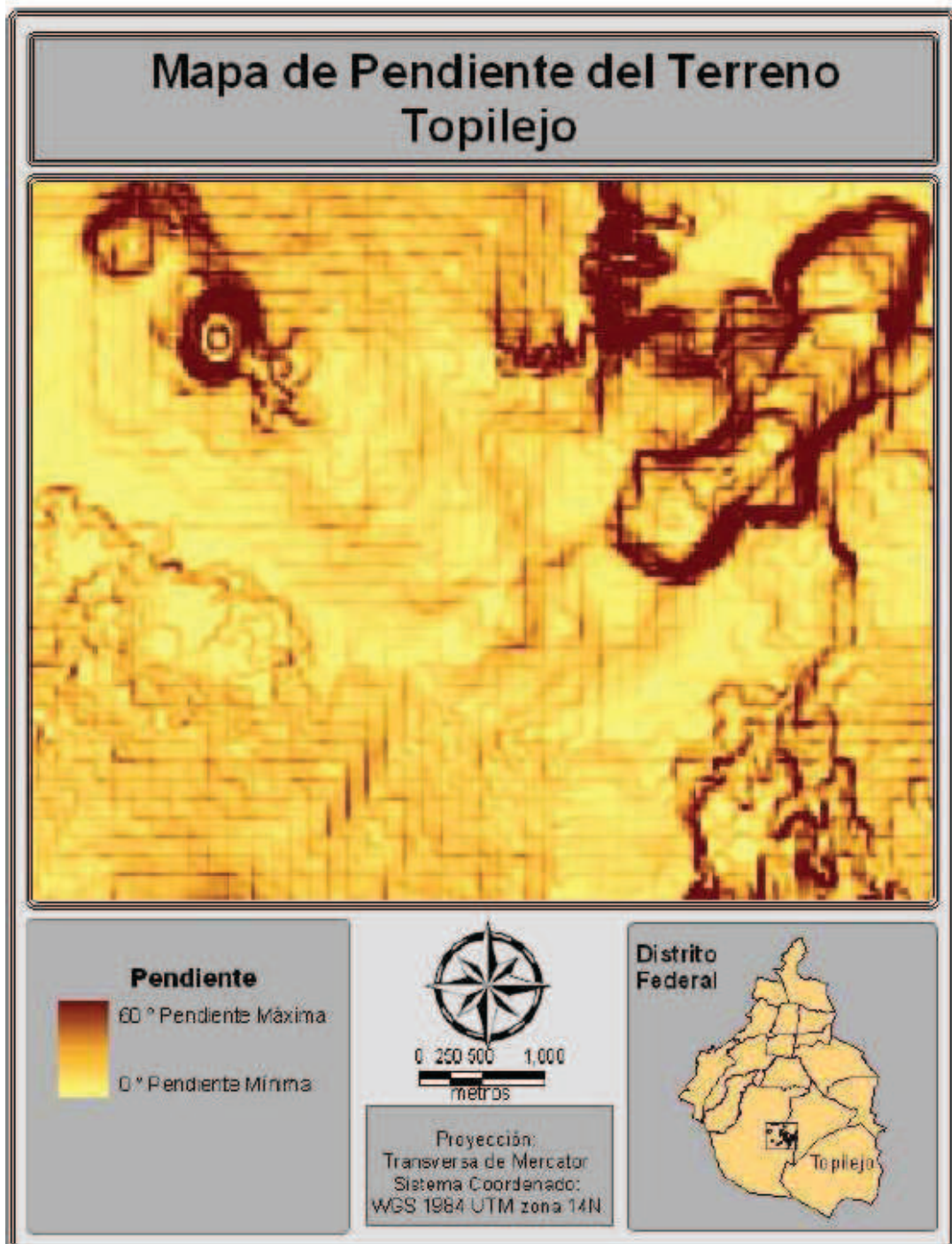


Figura 3.3.8. Mapa de pendientes de la zona de Topilejo. Serrano 2006.

Una vez obtenidos los datos se prosiguió a correr el “calibrador”, es decir, se utilizó el algoritmo evolutivo.

3.3.4. Resultados alcanzados

El trabajo tenía dos fines: uno, crear un modelo base para correr simulaciones de crecimiento urbano, y el otro, probar un algoritmo evolutivo, como método de calibración. El algoritmo evolutivo que se utilizó consta de generaciones de 8 individuos, de cada generación se toman los dos mejores y se reproducen, para crear la siguiente generación.

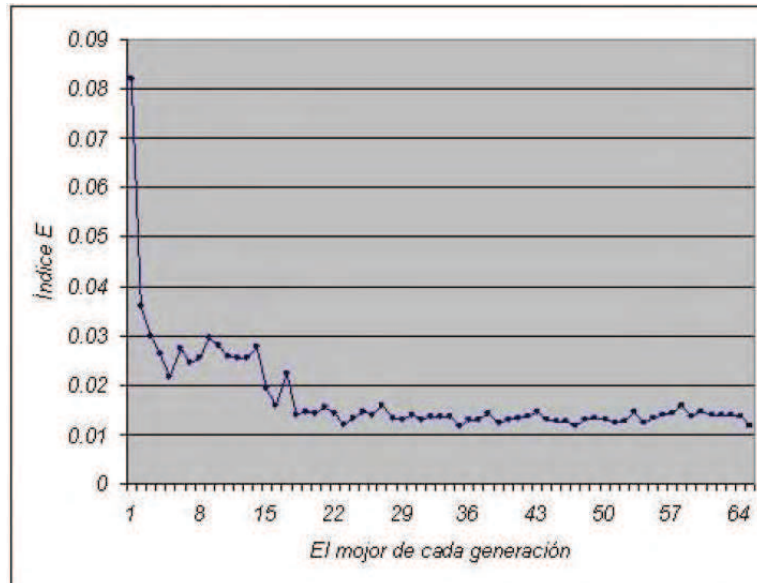


Figura 3.3.9. Desempeño del algoritmo calibrador. Serrano 2006.

El método de calibración probó ser una herramienta de utilidad, pues en aproximadamente dos semanas de “evolución”, se obtuvieron buenos resultados. Esto es un gran avance si consideramos que probar todas las combinaciones de parámetros nos hubiera llevado al menos un millón de días aproximadamente 2700 años.

En la figura 3.3.9 se muestra una gráfica del desempeño del algoritmo evolutivo. Cada punto en la gráfica representa el “mejor” de cada generación, para las primeras 65 generaciones. La gráfica muestra como el índice E baja rápidamente, hasta valores cercanos a 0.01, lo que significa que la salida del autómata es muy cercana a lo esperado. O sea que tenemos combinaciones de parámetros muy adaptados a las condiciones de la zona de estudio.

Dado que el modelo no es determinista, una vez encontrado un conjunto de parámetros “adaptados a Topilejo” para el periodo 1995-999, se requiere llevar a cabo cierto número de realizaciones para observar su comportamiento y evaluar el promedio del índice E . La figura 3.3.10 muestra el resultado de 50 realizaciones con estos parámetros para dicho periodo. Cada punto representa el índice de similitud entre la “predicción” del modelo y la situación observada para 1999.

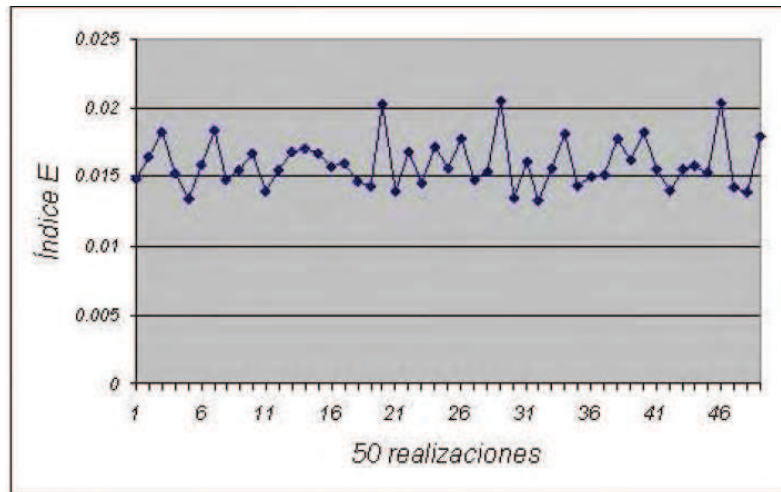


Figura 3.3.10. El mismo conjunto de parámetros para el periodo de 1994-1999. Serrano 2006.

Se encontró que el promedio del índice E para estas 50 realizaciones fue de:

$$\langle E(O_{1999}, A_{1999}) \rangle = 0.016 \quad (3.3.1)$$

donde O_i y A_i denotan la situación observada y la “predicción” del modelo para el año i , respectivamente. Esto nos da una idea de qué tanto logra el modelo ajustarse a lo observado en este periodo y en esta región. La desviación estándar de estos datos fue de $D = 0.0017$ lo cual nos indica la consistencia del modelo. El modelo base para simular la urbanización, debe juzgarse en tanto permita hacer algún tipo de “predicción”. Para verificar lo anterior tomamos como condición inicial a Topilejo en 1999, corrimos el modelo con los parámetros obtenidos mediante el algoritmo evolutivo, y comparamos el resultado del autómata con la situación observada en Topilejo en el año 2002. En la figura 3.3.11 se muestra esta comparación en 50 realizaciones del modelo para los mismos parámetros.

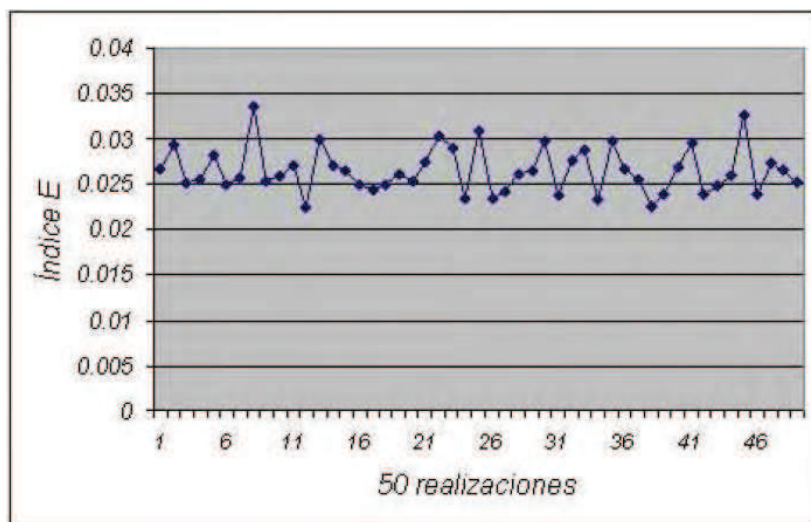


Figura 3.3.11. El mismo conjunto de parámetros para el periodo de 1999-2002. Serrano 2006.

El promedio del índice de similitud, E , entre las 50 realizaciones para el 2002 fue:

$$\langle E(O_{2002}, A_{2002}) \rangle = 0.026 \quad (3.3.2)$$

y su desviación estándar $D = 0.0025$.

Para darse una idea de qué significan los resultados arriba expuestos, el índice de similitud para los escenarios reales de 1999 y 2002 fue:

$$E(O_{1999}, O_{2002}) = 0.079 \quad (3.3.3)$$

y entre 1995 y 1999,

$$E(O_{1995}, O_{1999}) = 0.052 \quad (3.3.4)$$

Aquí cabe mencionar que el índice fue construido explícitamente para calibrar el modelo y no como una cantidad física del sistema. Y la calibración se puede juzgar visualmente en la figura 3.3.12, donde se puede observar la semejanza entre la salida del modelo (imagen) y la situación observada en el año 2002 (imagen).

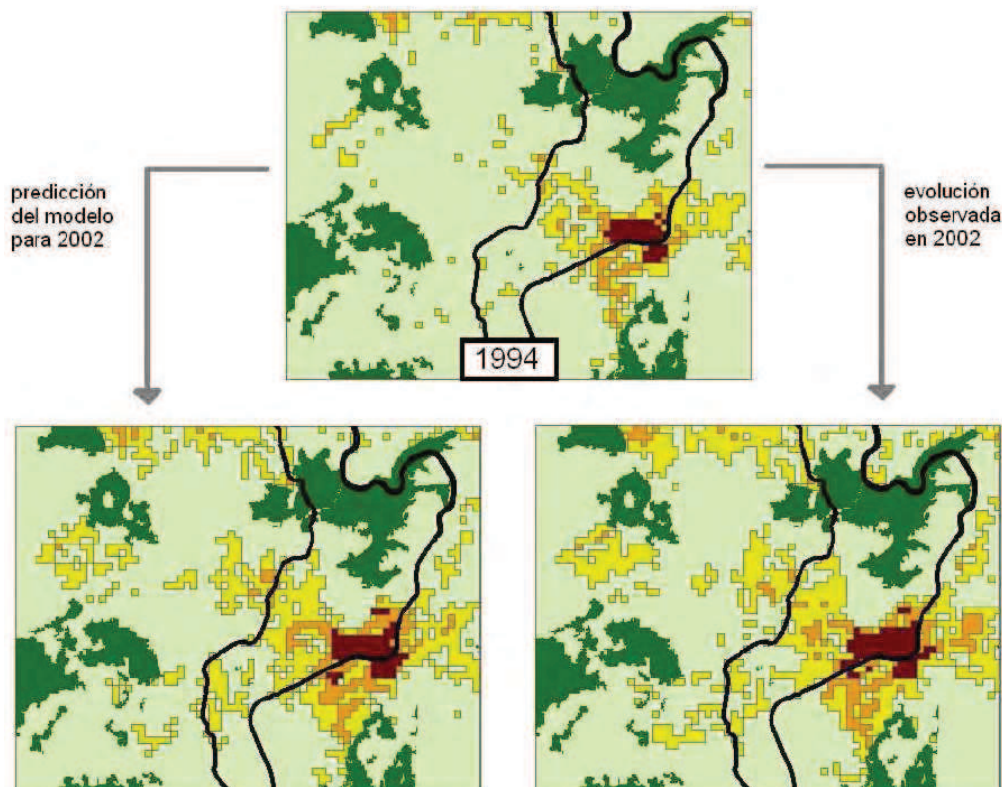


Figura 3.3.12 Comparación entre la salida del modelo y la situación observada para 2002. El área en color verde oscuro representa zonas de bosque, mientras que las zonas de colores amarillo, naranja y rojo representan la densidad de construcciones. Serrano 2006.

3.4. Conclusiones

En este capítulo se mostraron dos ejemplos de modelación y simulación de fenómenos urbanos utilizando a los Autómatas Celulares.

Cada caso utilizó una metodología diferente para alcanzar sus objetivos y cada uno dio resultados aceptables, y el análisis de sensibilidad muestra que las predicciones del modelo son relativamente exactas y reproducibles, lo que sugiere que los modelos basados en autómatas celulares, pueden ser útil en un contexto de planificación.

Una cosa importante que hay que destacar es que la utilización de los AC para el modelado y simulación de los cambios de uso de suelo y crecimiento urbano es aplicable a distintos ambientes, en este caso se aplicó en el primer caso a una ciudad de los E.U. y el segundo se aplicó a una localidad de México.

4. Caso de estudio: Los cambios de usos del suelo y crecimiento urbano en el pueblo de Ajusco

4.1. Introducción

Una de las primeras cosas que las personas utilizan para satisfacer sus necesidades es el uso que le dan al suelo - para establecerse (habitacional), para alimentarse (agrícola, ganadera o forestal), para trabajar (industrial o servicios), para moverse (vialidades y transporte), para descansar, entre otros. Estos usos cambian con el tiempo por diversas causas.

Una forma de explicar los usos del suelo y sus cambios es por las relaciones de las personas, su localización y su entorno.

El cambio de uso del suelo puede implicar (a) la conversión de un tipo de uso a otro - es decir, cambios en la combinación y el patrón de usos del suelo en un área o (b) la modificación de un determinado tipo de uso del suelo.

En el presente trabajo se utiliza la teoría de los autómatas celulares (AC) para explicar los cambios de usos del suelo del pueblo de Ajusco, en la Delegación de Tlalpan en el D.F.

Se analizará el pueblo de Ajusco porque existe la conversión en sus usos de suelo, debido principalmente al acelerado crecimiento del área urbana sobre suelo de preservación ecológica (agrícola, forestal, pastizal y matorral).

Se utilizó un modelo basado en AC y se generaron simulaciones que nos permitieron predecir estos cambios de uso del suelo, para diferentes periodos.

Así se tiene una herramienta o recurso, que puede ser utilizada para la planeación a corto, mediano y largo plazo.

Los factores principales que se tomaron en cuenta para modelar y simular los cambios de uso del suelo en el área del pueblo de Ajusco, fueron los elementos que componen la localidad (usos de suelo), la vialidad y las relaciones que existen entre ellos.

No se encontraron estudios que indiquen cómo son estas tendencias de cambios de uso de suelo y el crecimiento urbano, tanto a nivel espacial como temporal y su afectación a la población en la zona de estudio. Por lo que es indispensable contar con herramientas que permitan predecir estas conversiones entre los usos del suelo y sus posibles efectos.

4.1.1. Pueblos originarios de la Ciudad de México

La gran diversidad étnica que compone al Valle de México define en gran medida su identidad. Las personas que dejan su lugar de origen y se establecen en éste, son responsables directas en la configuración social, cultural, política y económica.

Aproximadamente en el año 1,000 a.C., se establecieron los primeros pueblos en el Valle de México, algunos todavía existen, conocidos como pueblos originarios.

Los pueblos originarios del Distrito Federal se encuentran asentados principalmente en las delegaciones de Xochimilco, Milpa Alta, Tláhuac, Tlalpan y Magdalena Contreras. Su principal característica es que han conservado un conjunto de instituciones políticas, culturales y sociales derivadas de una relación con la defensa de la integridad territorial y de los recursos naturales. Se les denomina pueblos originarios por ser descendientes en un proceso de compleja continuidad histórica de las poblaciones que habitaban antes de la conquista.

En la delegación de Tlalpan existen 8 pueblos originarios:

• San Andrés Totoltepec	• San Miguel Xicalco
• Santo Tomás Ajusco	• San Miguel Topilejo
• San Miguel Ajusco	• San Pedro Mártir
• Magdalena Petlacalco	• Parres el Guarda

Tabla. 4.1.1. Pueblos originarios en la Delegación de Tlalpan.

4.1.2. Antecedes históricos del pueblo de Ajusco

Diez años después de haberse realizado la conquista de México, el cacique Tecpanecatli fundó el pueblo de **Axusco** o **Axochco** en el año 1531, acordando los linderos y la construcción de un templo para el nuevo Dios.

Para los trabajos de construcción de la iglesia se trajeron gente azteca ya que conocían el labrado de la piedra y otras técnicas de construcción, al terminar la obra estas familias se quedaron a vivir en la parte baja del lugar, al sur de la barranca, éste es el origen del **barrio de San Miguel**; la gente de la parte de arriba, los axuscoapanecos es la que origina el **barrio de Santo Tomás**.

Se construyó primero la iglesia de Santo Tomás en el año de 1540, posteriormente en el año de 1707 se construyó la de San Miguel.

El nombre de los pueblos de San Miguel y Santo Tomás **Ajusco** se relaciona con los numerosos manantiales que se localizan en las faldas de la sierra del Ajusco, aunque se dice que también significa "lugar de ranillas" o "floresta en el agua". San Miguel y Santo Tomás Ajusco son dos de los ocho pueblos de Tlalpan considerados como originarios.

4.1.3. Localización

El Pueblo de Ajusco se localiza en la parte central de la delegación de Tlalpan, a una latitud de $19^{\circ}13'17''$ y a una longitud de $-99^{\circ}12'18''$, tiene una altitud que varía de los 2,925 msnm a los 3,000 msnm. Figura 4.1.3.

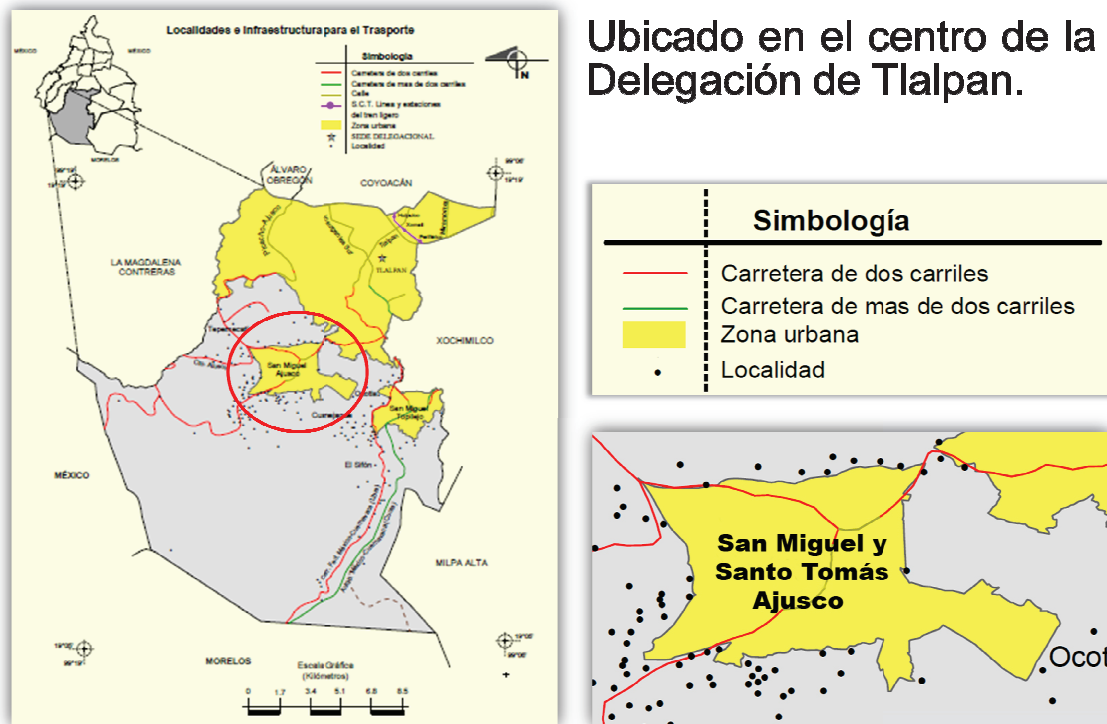


Fig. 4.1.3. Localización del pueblo de Ajusco en la Delegación de Tlalpan.
Fuente: INEGI: Prontuario de información geográfica delegacional de los Estados Unidos Mexicanos Tlalpan, Distrito Federal.

Cuenta con una superficie de 1057 has., que representa el 3.47 % del territorio de Tlalpan que es de 30449 has.

El Programa Delegacional de Desarrollo Urbano de Tlalpan del 2010 define 4 zonas homogéneas, siendo la zona 4, la de Poblados Rurales, donde se ubica el Pueblo de Ajusco, que comprende tanto a San Miguel como a Santo Tomás, así como sus alrededores.

La zona 4 la componen los poblados: Los Poblados Rurales de San Miguel y Santo Tomás Ajusco, San Miguel Xicalco, La Magdalena Petlacalco, San Miguel Topilejo y Parres el Guarda, los cuales en dicho programa se les asignan usos del suelo predominantemente habitacional rural con comercio y servicios básicos de influencia local. En general estas localidades rurales muestran una traza urbana irregular adaptada a la topografía del lugar.

4.1.4. Aspectos físicos

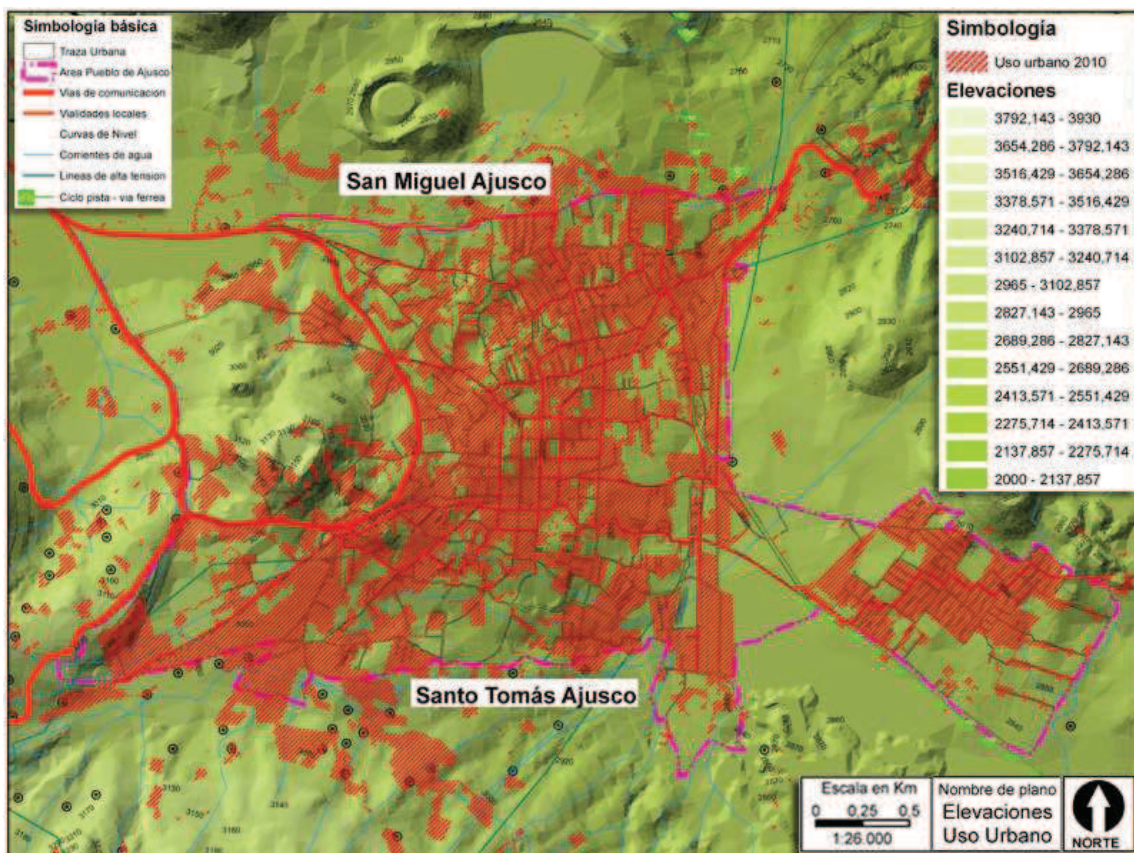
Relieve

El Pueblo de Ajusco se sitúa en la Sierra del Ajusco, cuyas sus principales elevaciones son:

- Cruz del Marqués: 3930 msnm
- Santo Tomás: 3710 msnm
- Pico del Águila: 3880 msnm
- Mezontepec: 3480 msnm

El pueblo de Ajusco tiene una altitud que va de los 2,925. a los 3,000 msnm.

En el plano 4.1.4. se muestra el relieve de la zona del Ajusco, en donde se puede apreciar que en la parte oeste existe una mayor elevación y la pendiente baja hacia el este. En el mismo plano se puede apreciar el área urbana (en rojo) del pueblo de Ajusco en el año de 2010. Posteriormente se mostrará que el crecimiento se está dando principalmente hacia la parte este, o sea, en las parte con menor pendiente, lo que indica que los nuevos habitantes prefieren estos terrenos para establecerse, a pesar de que no cuentan con los servicios básicos, como son el agua, luz y drenaje.



Plano 4.1.4.4. Área urbana del 2010 (en rojo) y el relieve del pueblo de Ajusco (en verde).
Elaboración propia, basa en imagen de Google Earth y datos del Centro Geo.

4.1.5. Aspectos demográficos

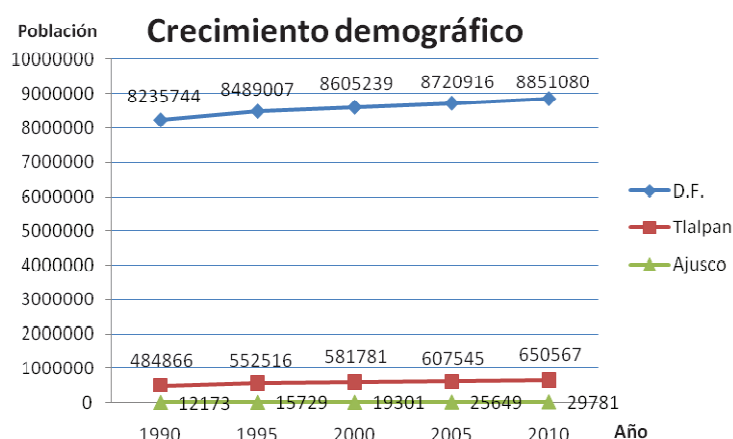
4.1.5.1. Crecimiento demográfico

El primer aspecto que se muestra es el crecimiento demográfico, que como se puede ver en la tabla y gráfica 4.1.5.1., ha sido notable en la zona de estudio desde el año de 1990, ya que ha presentado tasas de crecimiento mayores en comparación tanto a nivel delegacional como del D.F.

	D.F.	Tlalpan	% D.F.	Ajusco	% Tlalpan
1990	8235744	484866	5,89	12173	2,51
1995	8489007	552516	6,51	15729	2,85
2000	8605239	581781	6,76	19301	3,32
2005	8720916	607545	6,97	25649	4,22
2010	8851080	650567	7,35	29781	4,58

Tabla 4.1.5.1. Crecimiento demográfico de 1990 a 2010.

Elaboración propia con datos del INEGI: Censos de 1990, 2000 y 2010 y Conteos de 1995 y 2005.



Gráfica 4.1.5.1. Crecimiento demográfico en el D.F., Tlalpan y en el Pueblo de Ajusco.

Elaboración propia con datos del INEGI: Censos de 1990, 2000 y 2010 y Conteos de 1995 y 2005.

4.1.5.2. Tasas de crecimiento

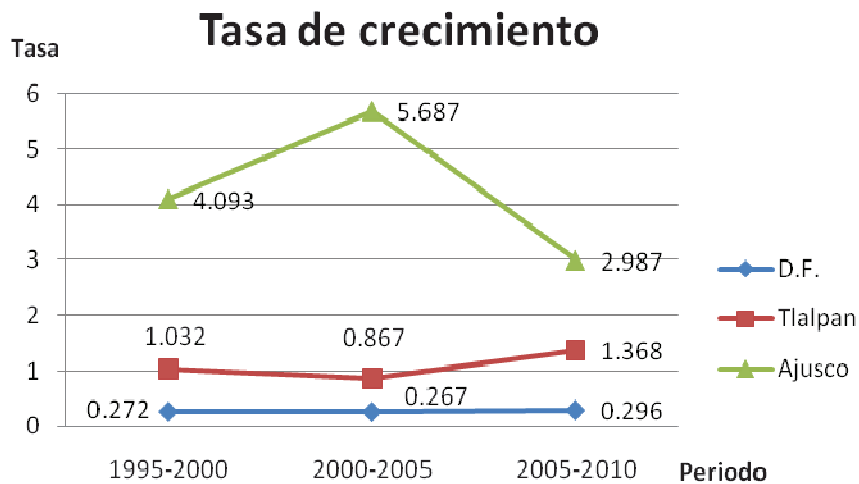
La dinámica demográfica se puede ver más claramente mediante las tasas de crecimiento. De tal suerte, que la zona de Ajusco, ha registrado un crecimiento mucho mayor si lo comparamos con el delegacional y con el registrado por el D.F. en los últimos 20 años, ello es una clara evidencia de un crecimiento producto principalmente de la inmigración, que analizará mas adelante. Ver tabla 4.1.5.2.

	1995-2000	2000-2005	2005-2010
D.F.	0,272	0,267	0,296
Tlalpan	1,032	0,867	1,368
Ajusco	4,093	5,687	2,987

Tabla 4.1.5.2. Tasas de Crecimiento de 1995 a 2010.

Elaboración propia con datos del INEGI: Censos de 2000 y 2010 y Conteos de 1995 y 2005.

Si bien el crecimiento de la zona de Ajusco ha ido en aumentando en los últimos 20 años, de acuerdo a los datos del censo del 2010, este crecimiento se ha desacelerado, mostrando su máximo en el periodo de 2000-2005. Ver gráfica 4.1.5.2.



Gráfica 4.1.5.2. Tasas de crecimiento de 1995 a 2010.
 Elaboración propia con datos del INEGI: Censos de 2000 y 2010 y Conteos de 1995 y 2005

4.1.5.3. Porcentaje de crecimiento poblacional

Otra manera de apreciar el incremento que ha tenido la zona de estudio es por el porcentaje de incremento de población, como se muestra en la tabla 4.1.5.3.

	1995-2000	2000-2005	2005-2010
D.F.	1,37	1,34	1,49
Tlalpan	5,30	4,43	7,08
Ajusco	22,70	32,89	16,11

Tabla 4.1.5.3. Porcentaje de crecimiento de 1990 a 2010.
 Elaboración propia con datos del INEGI: Censos de 2000 y 2010 y Conteos de 1995 y 2005

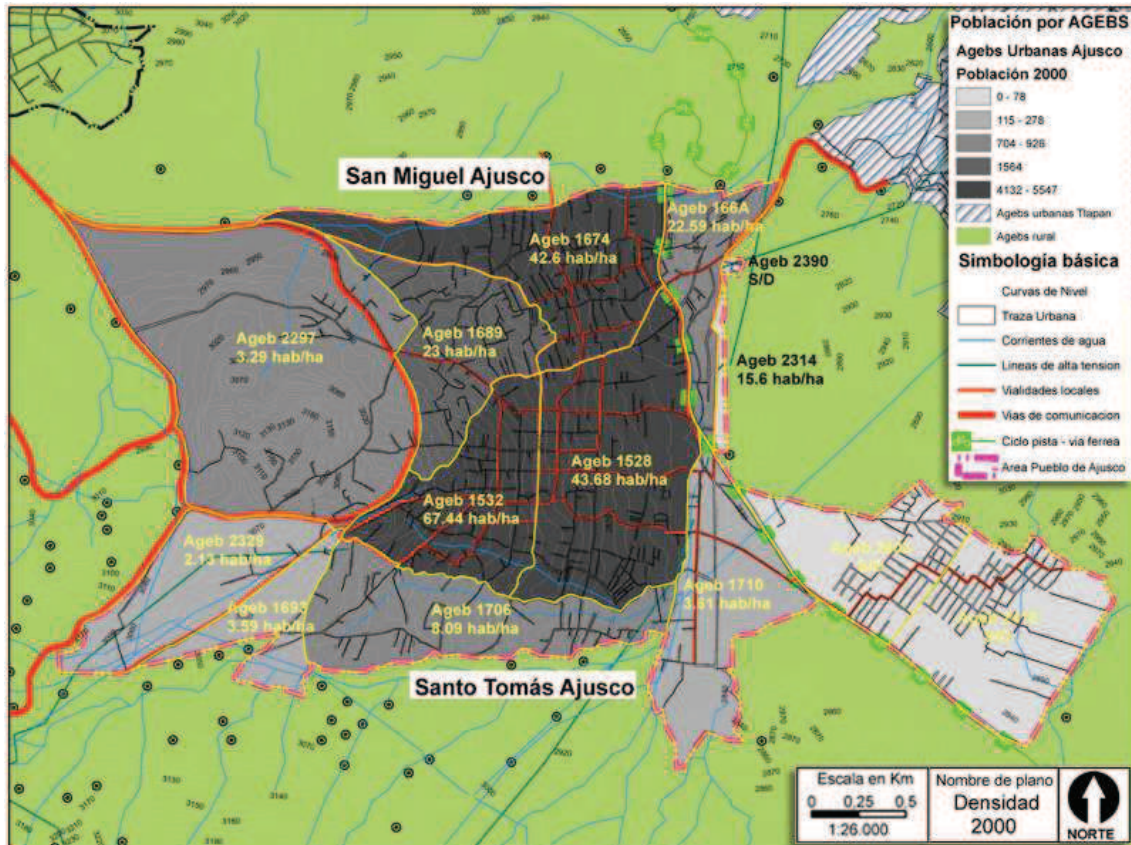
4.1.5.4. Densidad de población por AGEB en el año 2000

La densidad de población es una medida de distribución de población de una zona y que es equivalente al número de habitantes dividido entre el área donde habita.

Con el estudio de la evolución de la densidad de población por AGEB es posible ver el crecimiento que ha tenido el área urbana, el inconveniente que se tiene con este tipo de estudio es que se pierden detalles a nivel espacial, ya que se define un polígono (unidad política administrativa o bien geoestadística), sin tomar en cuenta el área real del uso de suelo urbano, sin embargo, es útil como base para saber las tendencias, tanto a nivel espacial como temporal.

En los siguientes planos se muestran los cambios de las densidades de población por AGEBs que ha tenido la zona de estudio en los años del 2000, 2005 y 2010.

En el plano 4.1.5.4., se puede ver que en el año del 2000 la mayor densidad de población se presentaba en las AGEBS centrales (1532, 1528 y 1674), que son donde se asentaron los primeros pobladores, hay que hacer notar que estas AGEBS están entre la carretera Picacho-Ajusco y las vía del tren (D.F.-Cuernavaca), lo que podría explicar su mayor crecimiento y sirviendo como límites de la zona urbana. Otro dato a resaltar es que en el año del 2000 no existían las AGEBS urbanas 2390, 2403 y 2418, que se ubican en la parte este del pueblo de Ajusco.



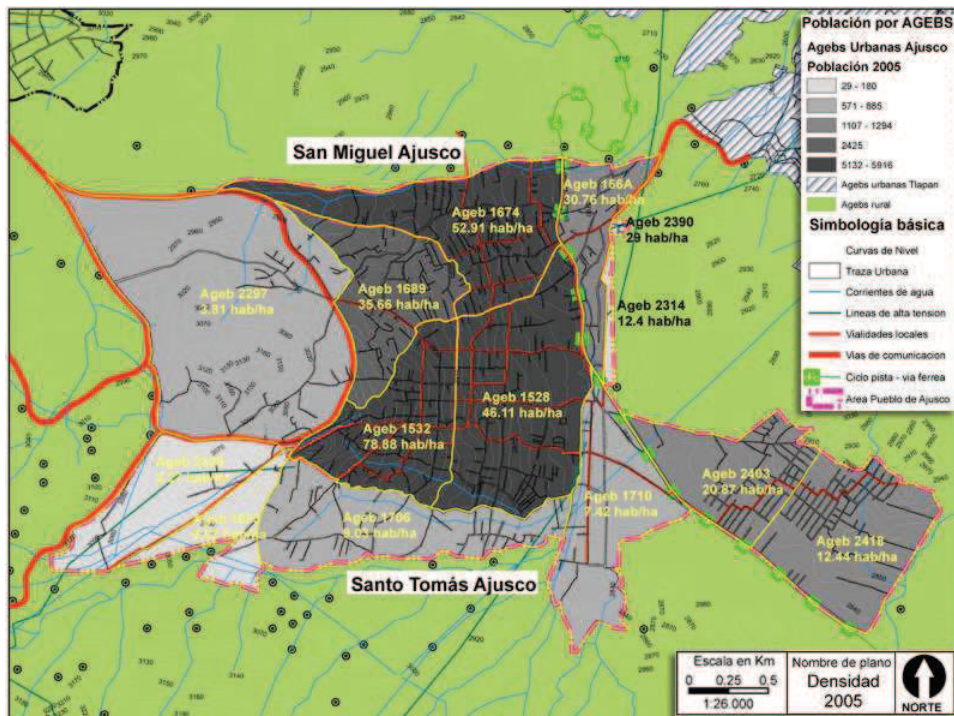
Plano 4.1.5.4. Densidad por AGEBS en la zona del Ajusco en el año de 2000.
Elaboración propia con datos del INEGI, censo 2000.

4.1.5.5. Densidad de población por AGEBS en el año 2005

Para el año 2005 se incrementa la densidad en todas las AGEBS urbanas que componen la zona de estudio. Se puede ver que para este año son creadas tres AGEBS urbanas que en el año 2000 no existían, éstas son la 2390, 2403 y la 2418, lo que indica un crecimiento del área urbana, principalmente sobre áreas agrícolas.

Un punto a resaltar sobre las últimas AGEBS urbanas creadas, es que tienen una mayor densidad de población que otras AGEBS con mayor tiempo, lo que puede indicar que existió una alta tasa de inmigración hacia la zona. Aun así las AGEBS centrales (1532, 1528 y 1674) siguen teniendo la mayor densidad. Ver Plano 4.1.5.5.

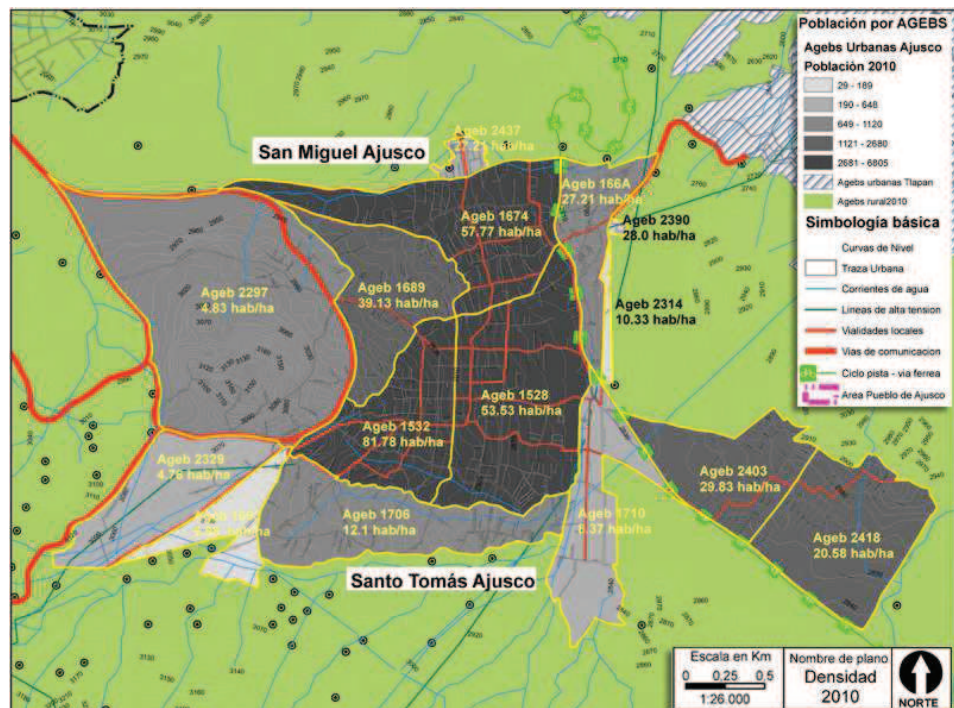
Modelado y simulación de sistemas urbanos complejos basado en autómatas celulares.
 Caso de estudio: Los cambios de usos del suelo y crecimiento urbano en el pueblo de Ajusco



Plano 4.1.5.5. Densidad por AGEBS en la zona del Ajusco en 2005. Elaboración propia.

4.1.5.6. Densidad de población por AGEB en el año 2010

En el año 2010, se crea la AGEB urbana 2437 al norte de la zona de estudio, indicando un crecimiento del área urbana y de la población. Ver el plano 4.1.5.6.



Plano 4.1.5.6. Densidad por AGEBS en la zona del Ajusco en 2010. Elaboración propia.

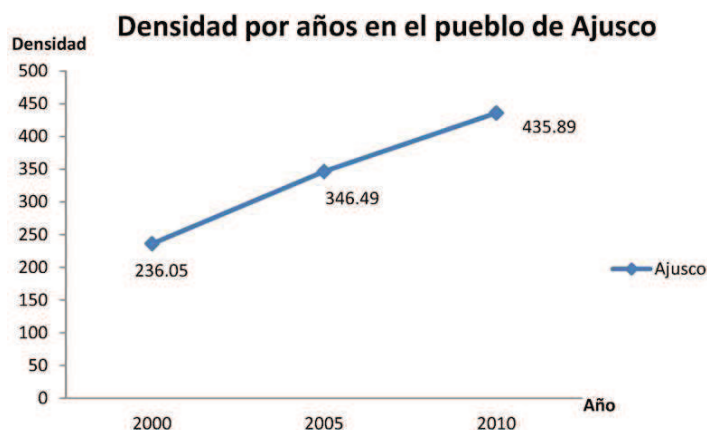
Se incrementa la densidad en la mayoría de las AGEBS, excepto en la 166A. Las densidades mayores se presentan en las AGEBS centrales, las cuales son la 166A, 1528, 1532, 1674 y la 1689, esto se debe a que fueron las primeras en crearse y las que concentran la mayoría de los servicios.

Se debe notar el incremento en la densidad de población en las AGEBS 2403 y 2418 que es muy superior a las demás, exceptuando las centrales, además éstas fueron creadas en 2005. Por visitas de campo a la zona de estudio, se comprobó que los habitantes de estas AGEBS son principalmente inmigrantes que adquirieron terrenos en esta zona debido al precio relativamente bajo, sin importar que esta venta fuera ilegal pero tolerada por los ejidatarios, que son los vendedores y por de las autoridades delegacionales, además de que no cuentan con servicios básicos, como agua potable o drenaje y teniendo un servicio eléctrico deficiente. Ver la tabla 4.1.5.6.a.

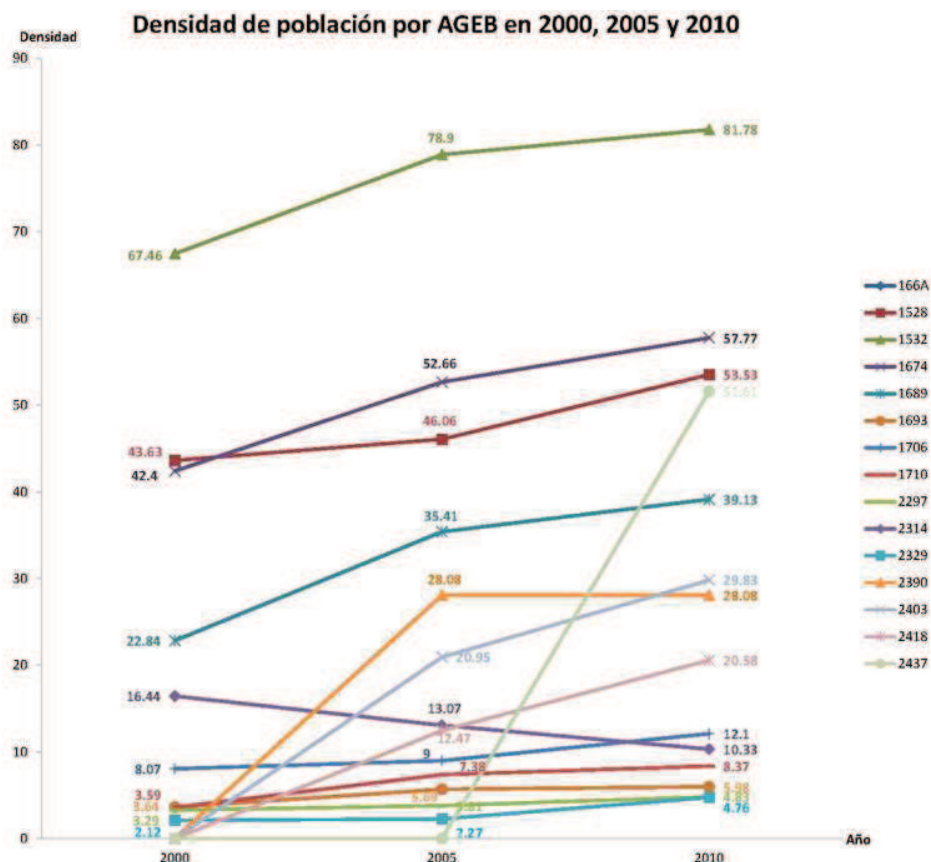
AGEB	2000			2005			2010			
	Población	Superficie Ha	Densidad	Población	Superficie Ha	Densidad	Población	Superficie Ha	Densidad	
Centrales	166A	926	41.02	22.57	1261	41.02	30.74	1116	40.99	27.21
	1528	5547	127.13	43.63	5856	127.13	46.06	6805	127.13	53.53
	1532	5058	74.98	67.46	5916	74.98	78.90	6132	74.98	81.78
	1674	4132	97.46	42.40	5132	97.46	52.66	5630	97.46	57.77
	1689	1564	68.49	22.84	2425	68.49	35.41	2680	68.49	39.13
Periféricas	1693	115	31.61	3.64	180	31.61	5.69	189	31.61	5.98
	1706	704	87.29	8.07	786	87.29	9.00	1056	87.28	12.10
	1710	278	77.39	3.59	571	77.39	7.38	648	60.98	8.37
	2297	763	232.01	3.29	885	232.01	3.81	1120	232.02	4.83
	2314	78	4.74	16.44	62	4.74	13.07	49	4.74	10.33
2329	136	64.02	2.12	145	64.02	2.27	305	64.02	4.76	
Creadas en 2005	2390	0	1.03	0.00	29	1.03	28.08	29	1.2	28.08
	2403	0	61.76	0.00	1294	61.76	20.95	1842	62.18	29.83
2005	2418	0	88.76	0.00	1107	88.76	12.47	1827	88.61	20.58
2010	2437	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	353	6.84	51.61

Tabla 4.1.5.6.a. Población, superficie en ha y densidad por AGEBS en los años 2000, 2005 y 2010
 Elaboración propia.

En la gráfica 4.1.5.6.a se muestra el aumento en la densidad en el pueblo de Ajusco en los años 2000, 2005 y 2010. En la gráfica 4.1.5.6.b se muestran las tendencias de la densidad por AGEBS.



Gráfica 4.1.5.6.a Densidad de población en los años 2000, 2005 y 2010. Elaboración propia.



Gráfica 4.1.5.6.b. Densidad de población por AGEB, años 2000, 2005 y 2010. Elaboración propia.

El mayor incremento de población se da en las AGEBs 2403 y 2418, creadas en el año del 2005, y en la AGEB 2437 creada en el año del 2010. Lo que puede indicar un crecimiento en el área urbana o una mayor densificación. Ver tablas 4.1.5.6.b.

	AGEB	2000		2005		2010	
		Población	% AGEB	Población	% AGEB	Población	% AGEB
Centrales	166A	926	4.80	1261	4.92	1116	3.75
	1528	5547	28.74	5856	22.83	6805	22.85
	1532	5058	26.21	5916	23.07	6132	20.59
	1674	4132	21.41	5132	20.01	5630	18.90
	1689	1564	8.10	2425	9.45	2680	9.00
Periféricas	1693	115	0.60	180	0.70	189	0.63
	1706	704	3.65	786	3.06	1056	3.55
	1710	278	1.44	571	2.23	648	2.18
	2297	763	3.95	885	3.45	1120	3.76
	2314	78	0.40	62	0.24	49	0.16
Creadas en 2005	2329	136	0.70	145	0.57	305	1.02
	2390	0	0.00	29	0.11	29	0.10
	2403	0	0.00	1294	5.05	1842	6.19
2010	2418	0	0.00	1107	4.32	1827	6.13
	2437	0	0.00	0	0.00	353	1.19

Tabla 4.1.5.6.b. Población y porcentaje por AGEB en los años 2000, 2005 y 2010
 Elaboración propia con datos del INEGI: Censos de 2000 y 2010 y Conteo 2005.

En la tabla 4.1.5.6.c. se marca en rojo el crecimiento más notable en las AGEBS. En la AGEB 1528 se da el incremento mayor por número de personas, ésta es una AGEB central, las AGEBS que le siguen por el aumento de personas son la 2403 y 2418, que fueron creadas en 2005. En la AGEB 2329 se da un incremento del 110% aunque en términos de población ésta solo crece en 160 habitantes.

AGEB	2005 Población	2010 Población	Diferencia		
			2005-2010	% 2005-2010	
Centrales	166A	1261	1116	-145	-11.49%
	1528	5856	6805	949	16.20%
	1532	5916	6132	216	3.65%
	1674	5132	5630	498	9.70%
	1689	2425	2680	255	10.51%
Periféricas	1693	180	189	9	5.00%
	1706	786	1056	270	34.35%
	1710	571	648	77	13.48%
	2297	885	1120	235	26.00%
	2314	62	49	-13	-20.96%
	2329	145	305	160	110.00%
Creadas 2005	2390	29	29	0	0.00%
	2403	1294	1842	548	42.00%
	2418	1107	1827	720	65.00%
Creada 2010	2437	0	353	353	-

Tabla 4.1.5.6.c. Diferencia de población por AGEB entre 2005 y 2010. Elaboración propia.

4.1.5.7. Migración

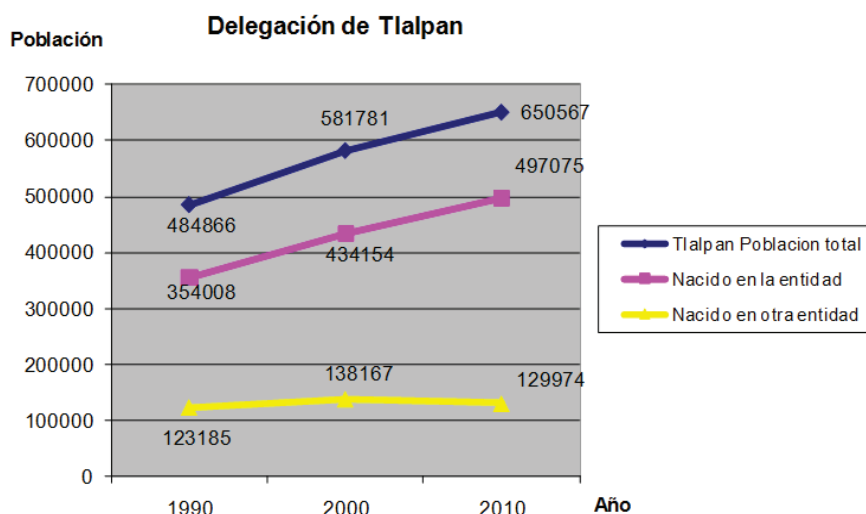
En este apartado se estudiará las variables de inmigración y nacimientos, para ver cuál ha sido su impacto en este crecimiento. Se denomina migración a todo desplazamiento de la población humana que se produce desde un lugar de origen a otro de destino y lleva consigo un cambio de la residencia habitual.

- **Tlalpan**

Para tener un punto de comparación, se muestran los valores de la población tanto inmigrante como la nacida en la delegación. En la tabla 4.1.5.7.a y la gráfica 4.1.5.7.a se muestran los datos de los años 1990, 2000 y 2010, de la población total de Tlalpan, así como el número de personas nacidas en la delegación y su porcentaje y el número de personas nacidas en otra entidad y su porcentaje.

	Tlalpan		Nacido en		
	Población total	Nacido en la Tlalpan	%	Nacido en otra entidad	%
1990	484866	354008	73,0	123185	25,4
2000	581781	434154	74,6	138167	23,7
2010	650567	497075	76,4	129974	20,0

Tabla 4.1.5.7.a. Migración en Tlalpan en 1990, 2000 y 2010.
 Elaboración propia con datos del INEGI: Censos de 1990, 2000 y 2010



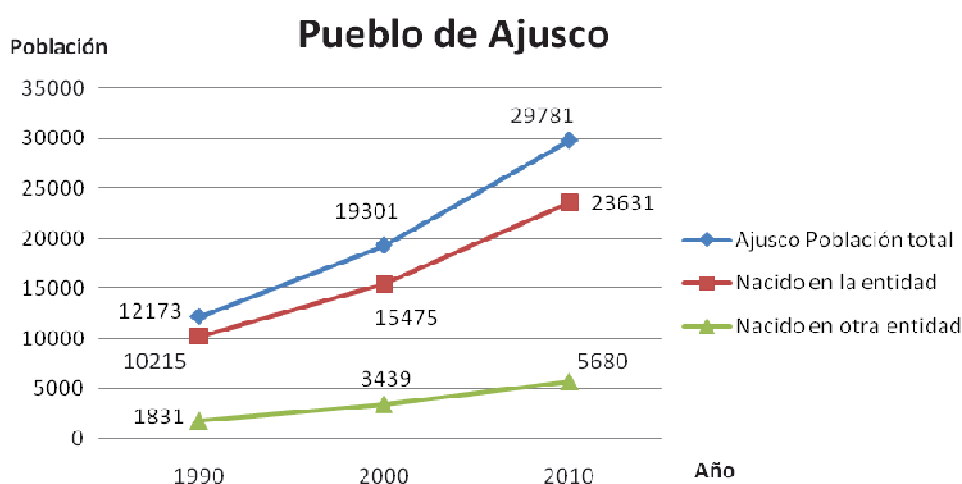
Gráfica 4.1.5.7.a. Migración en Tlalpan en 1990, 2000 y 2010.
 Elaboración propia con datos del INEGI: Censos de 1990, 2000 y 2010

• **Pueblo de Ajusco: San Miguel y Santo Tomás**

En la tabla 4.1.5.7.b y gráfica 4.1.5.7.b, se puede ver que la cantidad de la población nacida en la zona de estudio es mayoría, sin embargo el porcentaje de la gente nacida en otra entidad tiene una tendencia de crecimiento importante, ya que paso del 15% en el año de 1990 a un 19.1% en el año de 2010.

	Población total	Nacidos en la entidad	%	Nacidos en otra entidad	%
1990	12173	10215	83,9	1831	15,0
2000	19301	15475	80,2	3439	17,8
2010	29781	23631	79,3	5680	19,1

Tabla 4.1.5.7.b. Migración en el Pueblo de Ajusco en 1990, 2000 y 2010.
 Elaboración propia con datos del INEGI: Censos de 1990, 2000 y 2010.



Gráfica 4.1.5.7.b. Migración en el Pueblo de Ajusco en 1990, 2000 y 2010.
 Elaboración propia con datos del INEGI: Censos de 1990, 2000 y 2010.

4.1.5.8. Hogares y viviendas en el Pueblo de Ajusco

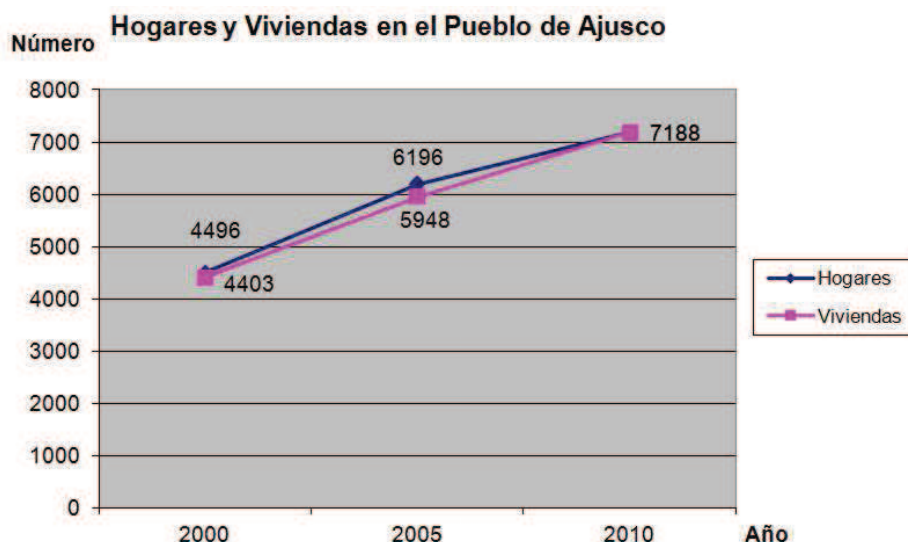
Para poder medir la magnitud del crecimiento del área urbana que ha tenido la zona de estudio, se hará a través de las variables del número de hogares y de viviendas, como un primer acercamiento.

De la tabla y la gráfica 4.1.5.8.a., se puede ver que el incremento de hogares y viviendas siempre ha ido en aumento y el promedio de ocupantes por vivienda ha disminuido y con el hecho de que la población ha aumentado podemos decir:

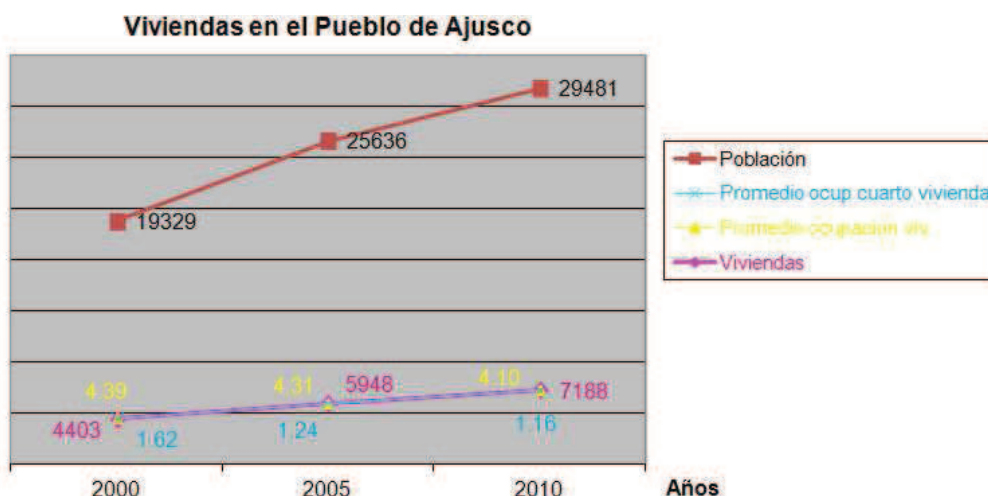
1. Que se han construido nuevas viviendas. Con los datos analizados no podemos decir si es en el mismo terreno o en nuevos, ya sean en los disponibles en el centro o en la periferia.
2. Que el número de familias ha crecido y que estás buscan tener una vivienda, ya sea rentada o propia.

	Hogares	Población hogares	Viviendas	Población Viviendas	Promedio ocupación por vivienda	Promedio ocupación por cuarto por vivienda
2000	4496	18993	4403	19329	4,39	1,62
2005	6196	25418	5948	25636	4,31	1,24
2010	7188	29481	7188	29481	4,10	1,16

Tabla 4.1.5.8.a. Hogares y Viviendas en el Pueblo de Ajusco en 2000, 2005 y 2010.
 Elaboración propia con datos del INEGI: Censos de 2000 y 2010 y Conteo 2005.



Gráfica 4.1.5.8.a. Hogares y Viviendas en el Pueblo de Ajusco en 2000, 2005 y 2010.
 Elaboración propia con datos del INEGI: Censos de 2000 y 2010 y Conteo 2005

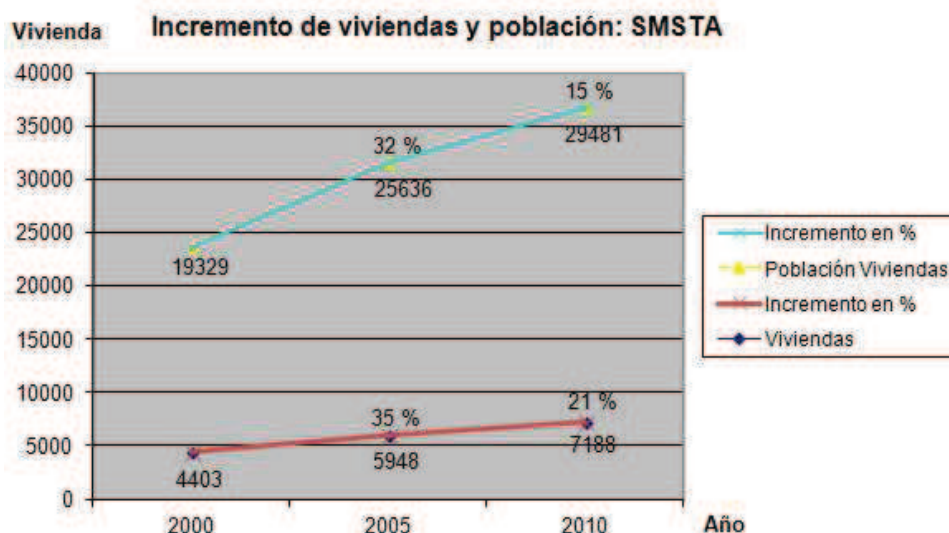


Gráfica 4.1.5.8.b. Viviendas en el Pueblo de Ajusco en 2000, 2005 y 2010.
 Elaboración propia con datos del INEGI: Censos de 2000 y 2010 y Conteo 2005

En la tabla 4.1.5.8.b y en la gráfica 4.1.5.8.c se muestra los datos del número viviendas y la población en los años 2000, 2005 y 2010 con el incremento en porcentaje que se dan entre los periodos del 2000 al 2005 y del 2005 al 2010. Se puede ver que el incremento en viviendas ha sido mayor en los últimos 10 años al incremento de la población, lo que puede indicar que el área urbana ha aumentado.

	Viviendas	Incremento en %	Población en viviendas	Incremento en %
2000	4403	-	19329	-
2005	5948	35	25636	32
2010	7188	21	29481	15

Tabla 4.1.5.8.b. Incremento de viviendas y población en el Pueblo de Ajusco en 2000, 2005 y 2010.
 Elaboración propia con datos del INEGI: Censos de 2000 y 2010 y Conteo 2005



Gráfica 4.1.5.8.c. Incremento de viviendas y población en el Pueblo de Ajusco en 2000, 2005 y 2010.
 Elaboración propia con datos del INEGI: Censos de 2000 y 2010 y Conteo 2005

Con el análisis la densidad a nivel AGEB y los aspectos demográficos de la zona de estudio se puede concluir que ha aumentado el área urbana, y que ha sido principalmente por gente inmigrante que se localiza en la periferia de la zona de estudio.

Con el estudio de las variables de vivienda y hogares se puede confirmar que ha habido un crecimiento tanto del área urbana como la densificación de ésta.

Lo anterior es un primer acercamiento en la determinación de las tendencias de crecimiento a nivel espacial y los cambios de uso.

Sin embargo no se puede tener una mayor precisión del crecimiento del área urbana y lo más importante, tampoco hacia donde está ocurriendo éste posible crecimiento, ni los cambios de uso de suelo, por lo anterior se necesitan utilizar otras herramientas que nos ayuden a contestar estas preguntas.

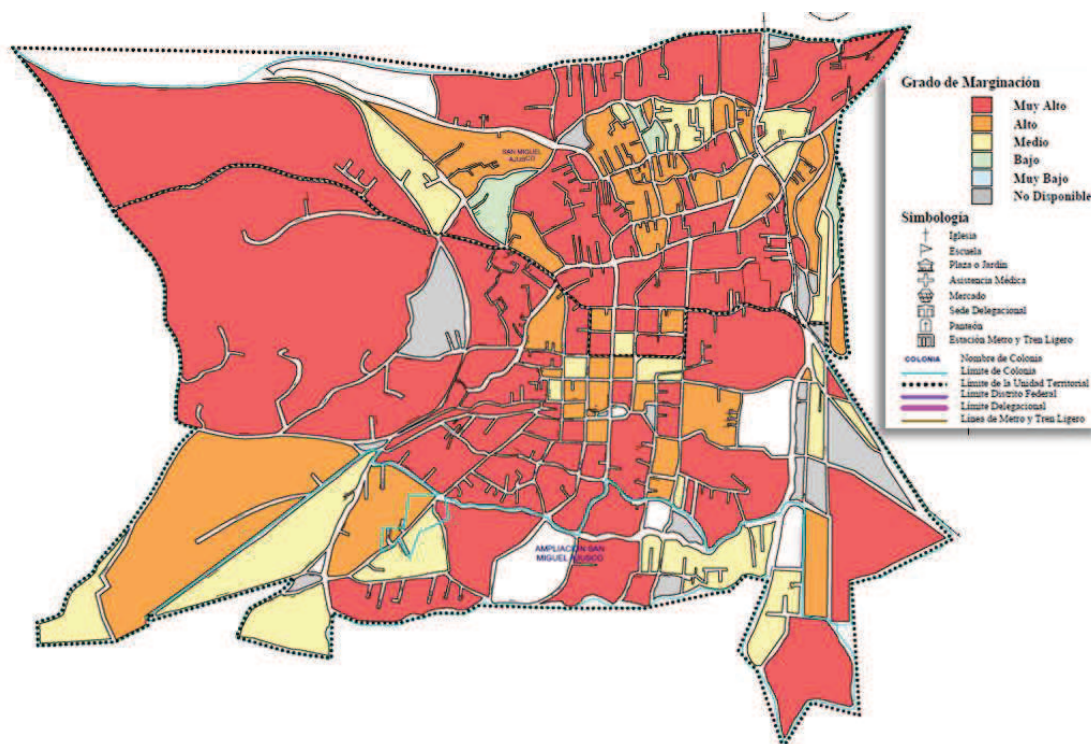
4.1.6. Aspectos de niveles de marginación

En el plano 4.1.6., se muestran los niveles de marginación que tienen las distintas áreas del pueblo de Ajusco, y como lo indican en los documento del portal del Sistema de Información de de Desarrollo Social del D.F., la zona del pueblo de Ajusco se considera con un nivel de marginación muy alto.

Por estudios que se han hecho en la zona (Schteingart y Salazar, 2005), y debido en gran medida al alto nivel de marginación, se presenta el fenómeno en el que los habitantes originarios son dueños de grandes extensiones de terrenos que eran usados principalmente para siembra de temporal, pero esta actividad ya no les es redituable, por lo que la han dejado y al no contar con otra fuente de ingresos se ven obligados a vender estos terrenos, y generalmente los nuevos dueños los utilizan para construir nuevas viviendas, por lo que el uso de suelo original, agrícola (principalmente), es cambiado a un uso de suelo urbano.

Cabe recordar que la mayoría de los terrenos vendidos son ejidales y que además están sobre suelo de conservación. Esto no ha impedido que se sigan vendiendo las tierras, ya que esto es tolerado tanto por los mismo ejidatarios como por la delegación de Tlalpan y el Gobierno del Distrito Federal.

Si bien, esta actividad resuelve temporalmente un problema económico, por otro lado, la falta de una planeación del crecimiento de la zona, generará otros problemas a mediano y largo plazo, que van a afectar tanto a los habitantes originarios como a los nuevos habitantes, como la falta de servicios básicos: agua, drenaje y energía eléctrica, entre otros.



Plano 4.1.6. Niveles de marginación en la zona del Ajusco en el año de 2000
Fuente: <http://www.sideso.df.gob.mx>

4.1.7. Aspectos jurídicos-administrativos

En el presente apartado se hablará de los aspectos jurídicos-administrativos en lo referente a la zonificación a nivel primario; de las facultades de la Comisión de Ordenamiento Territorial en la Delegación Tlalpan además de la descripción histórica que ha tenido la zona de estudio en materia de los usos de suelo, propiedad de la tierra, así como la situación actual.

En el anexo A.6 se hace un resumen de las principales Artículos, Leyes y Normas aplicables a la planeación de usos del suelo a nivel Federal y del D.F., como marco de referencia jurídico, el cual sienta las bases a nivel Delegacional. Así como un resumen de Programa Delegacional de Desarrollo Urbano del 2010, enfocado a los usos de suelo en la delegación.

4.1.7.1 Zonificación primaria

El D.F. se rige en la administración del suelo con los PDDU, en donde se realizaron las clasificaciones de zonificación normativa para establecer normas de ordenación de acuerdo a tres grandes rubros:

- Suelo Urbano,
- Suelo de Conservación,
- Comunidades y Poblados Rurales.

Suelo de conservación y suelo urbano

El Suelo de Conservación (SC) constituye el patrimonio natural del cual depende la sobrevivencia y bienestar de los habitantes del Distrito Federal, ya que esta zona proporciona bienes y servicios ambientales que permiten la viabilidad de la Ciudad, entre los que se encuentran: la captación e infiltración de agua a los mantos acuíferos, la regulación del clima, el mejoramiento de la calidad del aire, hábitat para la biodiversidad, oportunidades para la educación, investigación y recreación, producción de alimentos y materias primas, entre otros.

El SC ha estado permanentemente amenazado por el crecimiento de la ciudad y funciona como su reserva territorial. La presencia de asentamientos humanos irregulares, así como el desarrollo inmobiliario, han contribuido a que la urbanización se desplace hacia las zonas rurales. Esto ha causado, entre otros, los siguientes problemas:

- Sobreexplotación de los mantos acuíferos,
- Daños a la cubierta vegetal,
- Contaminación del suelo,
- Deforestación y erosión,
- Pérdida de la vegetación natural y biodiversidad,
- Disminución de especies de flora y fauna silvestre.

De continuar con las dinámicas actuales de crecimiento urbano y cambio de uso del suelo, los bienes y servicios ambientales, de los cuales depende la Ciudad de México, se verán significativamente disminuidos en cantidad y calidad afectando severamente la calidad de vida de los habitantes del D.F.

La Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, creó la Agenda Ambiental de la Ciudad de México 2007-2012, la cual tiene como objetivo: "Proteger el Suelo de Conservación" como espacio clave del equilibrio ambiental en la Ciudad, mediante la conservación de sus ecosistemas que lo conforman, así como preservar la flora y fauna silvestres para garantizar la permanencia de los servicios ambientales.

Se han creado las siguientes estrategias:

- Controlar y ordenar los asentamientos humanos irregulares.
- Tener un ordenamiento territorial para controlar el crecimiento natural de los poblados rurales.
- Detener las tendencias de deterioro de los ecosistemas, incrementando la efectividad e integración de las acciones de restauración.
- Proteger y asegurar la conservación de los ecosistemas y la continuidad de los bienes y servicios ambientales que presta el SC.
- Pagar por los bienes y servicios ambientales, que brindan las tierras y ecosistemas del SC.

- Fortalecer de los sistemas productivos tradicionales y agroecológicos para la conservación de los recursos naturales y genéticos.
- Consolidar el Sistema de ANP del Distrito Federal

Se plantearon los siguientes programas:

- Programa asociado con la estrategia para el control y ordenamiento de los asentamientos humanos irregulares.
- Programa asociado con la estrategia sobre el ordenamiento territorial para controlar el crecimiento natural de los poblados rurales.
- Programas asociados con la estrategia para detener las tendencias de deterioro de los ecosistemas, incrementando la efectividad e integración de las acciones de restauración.
- Programas asociados con la estrategia para proteger y asegurar la conservación de los ecosistemas y la continuidad de los bienes y servicios ambientales que presta el SC.
- Programas asociados con la estrategia para la consolidación del sistema de ANP del Distrito Federal.
- Programas asociados con la estrategia para el pago por los bienes y servicios ambientales que brindan las tierras y ecosistemas del SC.
- Programas asociados con la estrategia para el fortalecimiento de los sistemas productivos tradicionales y agroecológicos para la conservación de los recursos naturales y genéticos.

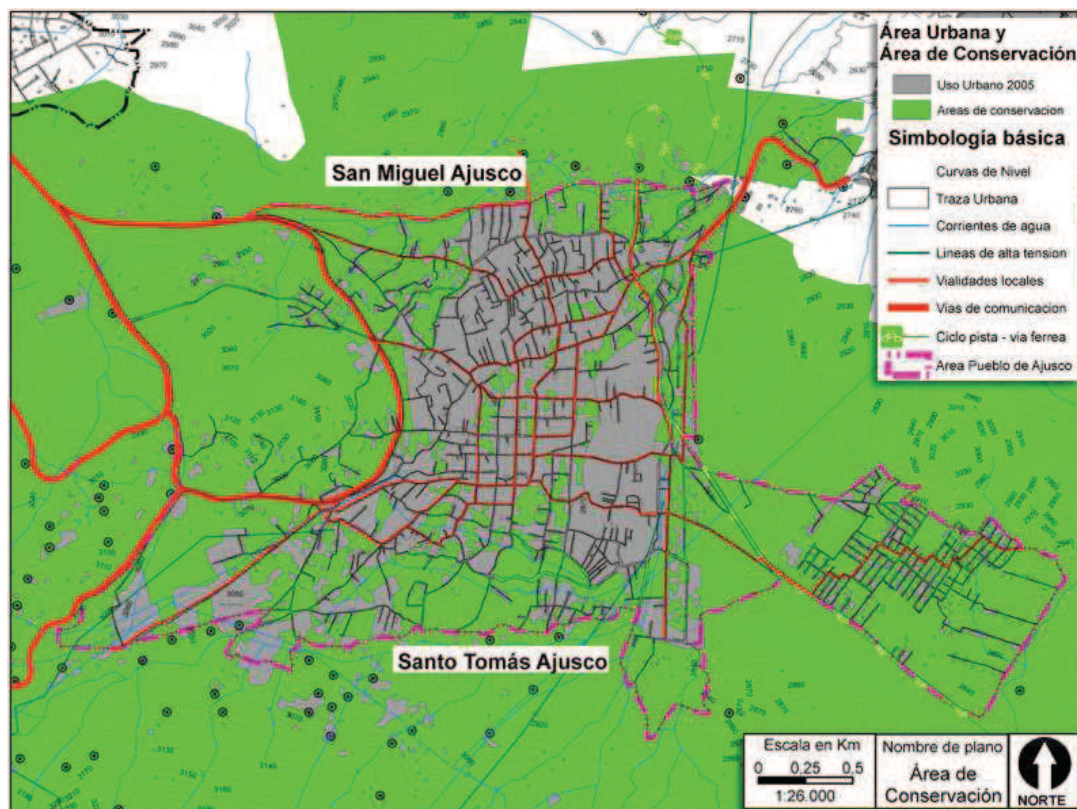
Comunidades y pueblos rurales

En la Delegación de Tlalpan se distinguen 4 zonas que por su mezcla de usos del suelo, se pueden clasificar como zonas homogéneas.

Los poblados de San Miguel y Santo Tomás Ajusco pertenecen a la zona 4, por lo que son considerados poblados rurales. Los cuales muestran usos del suelo predominantemente habitacional rural con comercio y servicios básicos de influencia local. En general estas localidades rurales muestran una traza urbana irregular adaptada a la topografía del lugar.

En el plano 4.1.7.1. se muestra la zona urbana del Pueblo de Ajusco, el cual está rodeado por suelo de conservación.

El Pueblo de Ajusco por estar en una zona de Conservación Ecología se debería aplicar la Agenda Ambiental de la Ciudad de México creada por la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, sin embargo por visitas y entrevistas hechas en la zona de estudio, estas iniciativas no se han llevado a cabo.



Plano 4.1.7.1 Zonificación a nivel primario: suelo urbano de conservación en 2005. Elaboración propia.

4.1.7.2. Comisión de ordenamiento territorial en la Delegación Tlalpan¹

La Delegación Tlalpan comprende una superficie de 30449 has., de las cuales el 16.4 % (5023 has) corresponden al suelo urbano y el 83.6% restante (25426 has) se encuentra clasificado como suelo de conservación ecológica. Existen 170 asentamientos humanos irregulares en suelo de conservación ecológica, 7 pueblos rurales, 7 asentamientos humanos irregulares en suelo urbano y 12 núcleos agrarios que han quedado al margen de un ordenamiento territorial que permita optimizar la calidad de vida de sus habitantes y su nivel productivo².

Al existir varias formas de tenencia de la tierra en la demarcación, fuerte presión demográfica, especulación desmesurada del suelo y una creciente demanda en los servicios públicos, la eficacia en la actuación Delegacional resulta limitada para cumplir los objetivos de optimizar el Ordenamiento Territorial y el aprovechamiento del suelo a través de la creación y aplicación de instrumentos que permitan controlar los procesos urbanos y ambientales, revertir el crecimiento expansivo de la ciudad, encauzando la distribución armónica de la población en el territorio. Por lo que la Dirección General Jurídica y de Gobierno, de Obras y Desarrollo Urbano y Ecología y Desarrollo Sustentable estableció un instrumento de Ordenamiento Territorial en la Delegación.

¹ Gaceta oficial del Distrito Federal, 23 de Septiembre del 2005

² De acuerdo al PDDU del 2010 de Tlalpan.

Creándose la Comisión de Ordenamiento Territorial en la Delegación Tlalpan, órgano de planeación, coordinación y control de usos, destino y reservas del suelo de la Delegación Tlalpan, con el fin de establecer las normas, lineamientos, políticas, acciones e instrumentos necesarios para lograr la distribución armónica de los usos, destinos y reservas de suelo con los asentamientos humanos, así como las actividades y derechos de sus habitantes, priorizando la conservación natural del entorno ecológico y su mejoramiento.

La Comisión está integrada por las siguientes áreas:

- I. Dirección de Ordenamiento Territorial,
- II. Dirección de Regularización Territorial y Tenencia de la Tierra y
- III. Dirección de Conservación de Recursos Naturales, quienes aunado a las Titulares de cada Dirección General, contarán con facultades para suscribir Actas, Acuerdos, Comisiones, Minutas y cualquier otro documentos resultante de las actividades de la Comisión.

En las resoluciones de los asuntos que le sean planteados a la Comisión, deberán considerarse los aspectos técnicos, ambientales, jurídicos y sociales que en razón de su competencia proporcionará cada integrante.

La Comisión tiene las siguientes tareas, entre otras:

- I. Realizar un diagnóstico técnico-jurídico por zona territorial que permita identificar la problemática particular de cada uno de los poblados que conforman la población,
- II. Elaborar un Sistema de Información o Base de Datos que detalle las características técnicas, jurídicas y socioeconómicas, de cada uno de los asentamientos irregulares de la demarcación,
- III. Elaborar un Registro Único de Asentamientos Humanos Irregulares en Suelo de Conservación Ecológica y Suelo Urbano.

Las Políticas, Normas, Bases y Lineamientos que surjan derivados de la actividad de la Comisión se traducirán en los instrumentos jurídicos que correspondan (Programa Delegacional de Desarrollo Urbano, Programa Delegacional, Circulares, Convenios, Dictámenes, Opiniones, Resoluciones, etc.).

La comisión dará observaciones sobre lo siguiente:

- I. Materia Técnica
 - a) Ubicación física y georeferenciada del área sometida a análisis,
 - b) Factores y riesgos ambientales, geológicos, hidrológicos, etc.,
 - c) Factibilidad en la introducción de servicios (agua, drenaje, pavimentación) o de sistemas de alternos de autoabasto,
 - d) Impacto ambiental generado por el asentamiento,
 - e) Aspectos urbanísticos,

- f) Condiciones actuales del uso de suelo y mejoramiento del entorno y
- g) Crecimiento poblacional.

II. Materia Jurídica

- a) Tipo de propiedad,
- b) Tipo de Derechos generados por la ocupación,
- c) Formas de transmisión en la Tenencia de la Tierra y su legitimidad,
- d) Mecanismos posibles de regularización,
- e) Antigüedad y grado de consolidación,
- f) Características socioeconómicas y estructura poblacional,
- g) Tratamiento al cual quedarán sujetos; consolidación redensificación, reubicación, etc.

Aunque existe la Comisión de Ordenamiento Territorial en la Delegación Tlalpan, pasa lo mismo que a nivel del D.F., qué es la falta de aplicación de sus atribuciones para el controlar los procesos urbanos y ambientales y revertir el crecimiento de la zona urbana.

4.1.7.3. Zona de San Miguel y Santo Tomás Ajusco

Situación actual

Los problemas de la tenencia de la tierra en el pueblo de Ajusco y en general en toda la zona de pueblo de la delegación de Tlalpan, tienen su repercusión directa con los cambios de uso del suelo, son los correspondientes a la pérdida del territorio comunal, después de la Reforma Agraria. Estas reducciones tienen dos causas diferentes: las expropiaciones por causa de utilidad pública, hechas por el gobierno y las ventas ilegales de tierras ejidales y comunales.

Expropiación de tierras comunales

Las expropiaciones en esta región datan de los últimos 30 años, es decir, aproximadamente desde 1945, y corresponden con el crecimiento de la Ciudad de México. La primera amenaza de expropiación se remonta a 1937, durante el gobierno de Cárdenas y que está relacionada con la creación del parque nacional del Ajusco.

Venta de tierras comunales y ejidales

Con la expansión de la ciudad, se especuló con los terrenos que están bien situados, los que tienen vista panorámica de toda la región. También se da muy frecuentemente el caso de que los pequeños propietarios vendan terrenos ejidales que limitan con sus parcelas, toda vez que los límites son imprecisos y que no es común cuestionar este tipo de ilícitos. Sin embargo desde 1970 el comité comunal del Ajusco realizó las primeras denuncias.

Es comprensible que los campesinos que al hacer cuentas, ven que pueden sacar mayor provecho vendiendo sus parcelas que seguir sembrándolas. Como se ha visto, la venta de terrenos ejidales y comunales se ha dado desde por lo menos 50 años, y esto es difícil de impedir, dadas las influencias políticas y a las necesidades de los pobladores. La tierra de los pueblos se sigue reduciendo.

En ninguna parte los ejidatarios o los comuneros poseen las doce hectáreas de tierras necesarias para echar a andar la parcelación, por lo que no son suficientes para mantener decentemente a una familia campesina.

Minifundismo y la falta de recursos para actividades agropecuarias

Las tierras que entregó la Reforma Agraria no eran lo suficientemente buenas y no sirvieron para mejorar las fuentes de ingresos. En su mayoría eran tierras de agostadero, terrenos montañosos, no aptos para la agricultura y cuya única fuente de recursos era la explotación forestal y las tierras de cultivo eran de temporal, por lo que se practica solo una agricultura de subsistencia. Esto demuestra con claridad que las tierras de la sierra son muy poco favorables para la agricultura y que la vocación de la región es la cría de animales y el aprovechamiento de los bosques. Por otra parte, en la mayoría de los casos las tierras montañosas son de difícil acceso, quedando lejos de los pueblos, lo que dificultaba su explotación. Tiempo después también se prohibió la explotación del bosque por los riesgos de la erosión. Además los campesinos no tenían los recursos para invertir en la construcción de granjas agropecuarias modernas. De esta manera, la dotación de la Reforma Agraria significó un provecho muy limitado para los campesinos.

Por otro lado, la presión demográfica redujo progresivamente las pocas tierras disponibles. Más de la mitad de las parcelas, el 51.8 %, tiene menos de una hectárea. Ya no se trata de minifundios sino de microfundismo. El 87.4 % de la población propietaria de tierras en Ajusco tienen menos de cinco hectáreas. Lo anterior demuestra que la insuficiencia de las tierras desalienta al campesinado de la agricultura y lo que causa que esta actividad desaparezca de esta zona.

4.2. Evolución de los cambios de usos del suelo

En este apartado se mostrará la evolución de los cambios de usos del suelo que ha tenido la zona de estudio en los años de 1970, 1997, 2000, 2005 y 2010. Para los años de 1970, 1997, 2000 y 2005 se utilizó la información que proporciona la PAOT y el Centro Geo a través de la página web de la PAOT³. Los planos de los años de 1970, 1997 y 2000 se presentan sólo como antecedentes y se deben tomar con reserva, ya que la información obtenida no es muy precisa.

Para los datos del año 2010 se calcularon las áreas de los usos del suelo a partir de imágenes aéreas de la zona de estudio, a través de Google Earth.

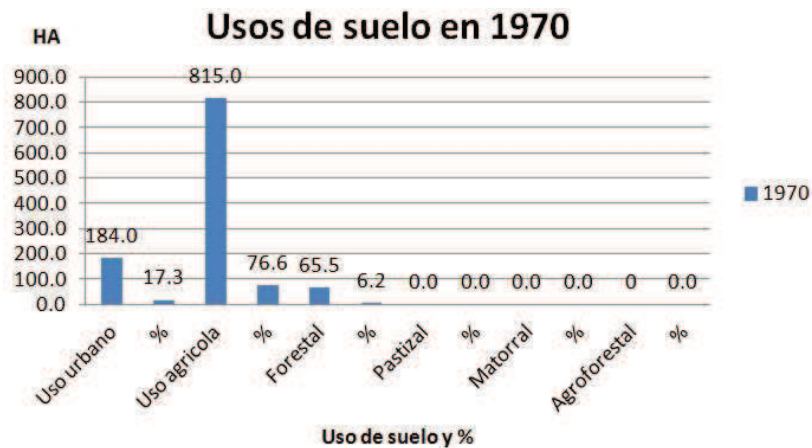
³ http://www.paot.org.mx/paot_docs/GEO_DATO/principal_002.html

4.2.1. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 1970

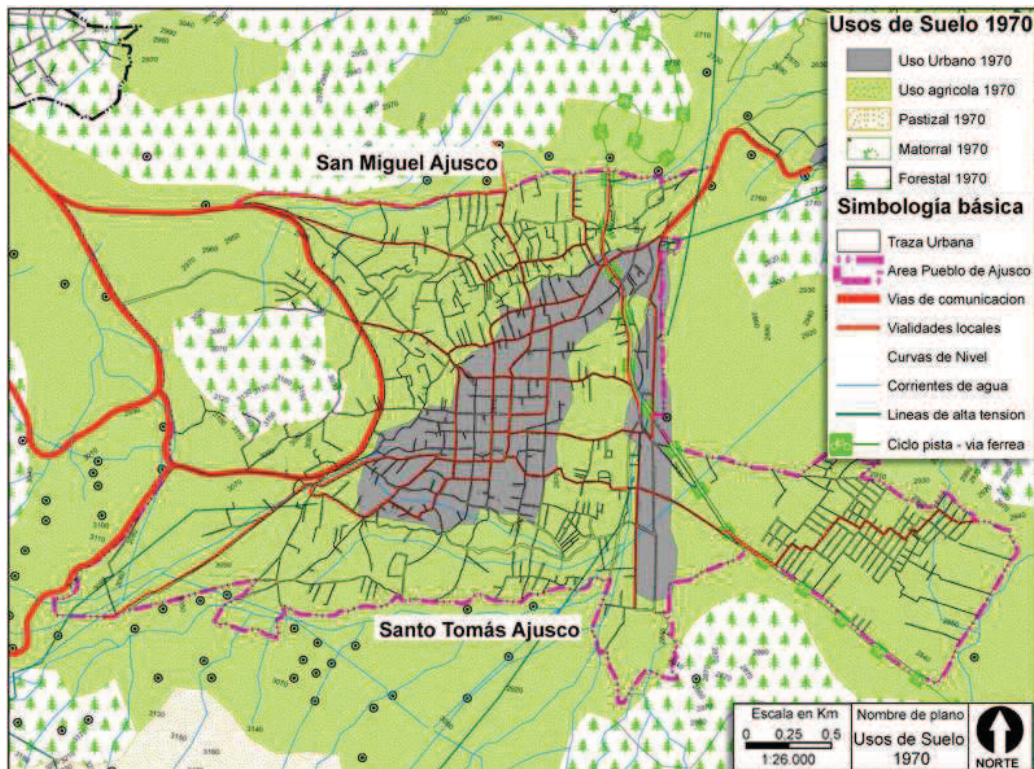
El primer año de análisis fue 1970, en este año el área de uso de suelo urbano es del 17.3% y el 82,7% era no urbano, destacando el uso del suelo agrícola con un 76.6%. Estos datos se pueden ver en la tabla, gráfica y plano 4.2.1.a.

	Uso urbano	Uso agrícola	Forestal	Pastizal	Matorral	Agroforestal
1970 (Ha)	184.0	815.0	65.5	0.0	0.0	-
%	17.3	76.6	6.2	0.0	0.0	-

Tabla 4.2.1.a. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 1970. Elaboración propia.



Gráfica 4.2.1.a. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 1970. Elaboración propia.



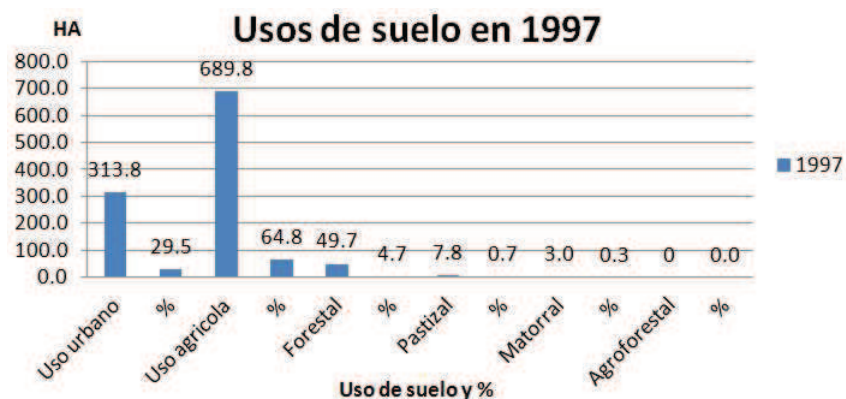
Plano 4.2.1.a. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 1970. Elaboración propia.

4.2.2. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 1997

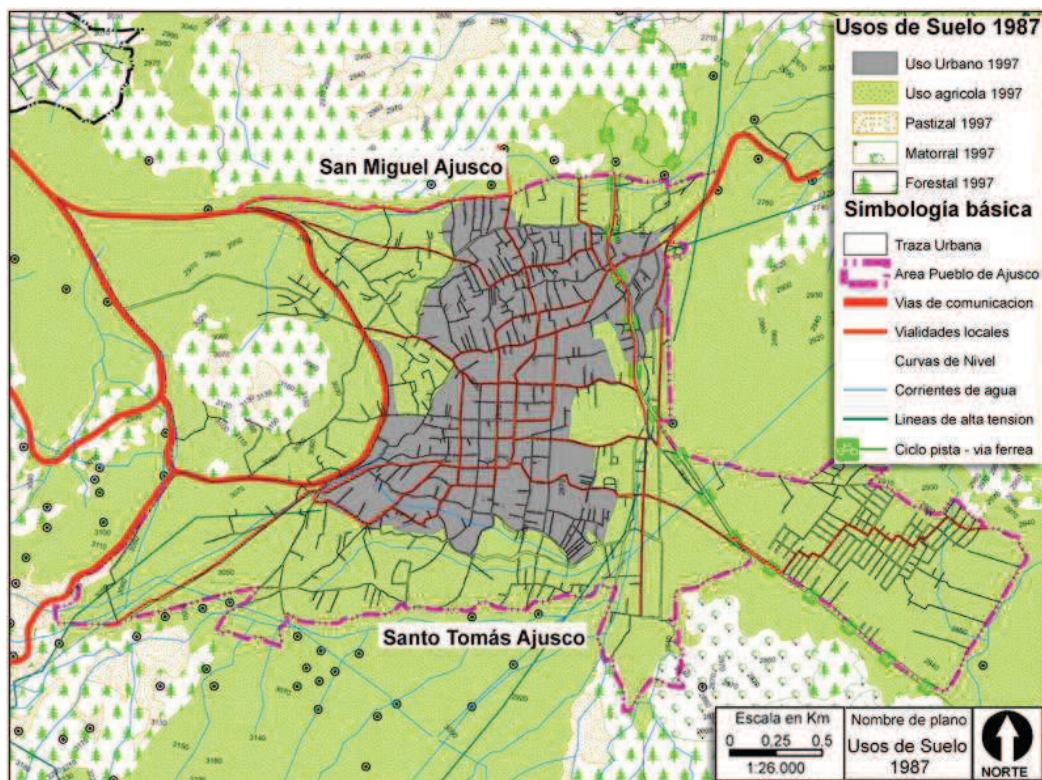
Para 1997 el área urbana creció hasta el 29.5%, en 27 años se incrementó en 12.2%. El suelo agrícola decreció hasta el 64.8%, es decir perdió 11.8% con respecto al año de 1970. El suelo forestal disminuyó y se incrementaron el área del suelo de pastizal y matorral. Ver la tabla, gráfica y plano 4.2.2.a.

	Uso urbano	Uso agrícola	Forestal	Pastizal	Matorral	Agroforestal
1997	313.8	689.8	49.7	7.8	3.0	-
%	29.5	64.8	4.7	0.7	0.3	-

Tabla 4.2.2.a. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 1997. Elaboración propia.



Gráfica 4.2.2.a. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 1997. Elaboración propia.



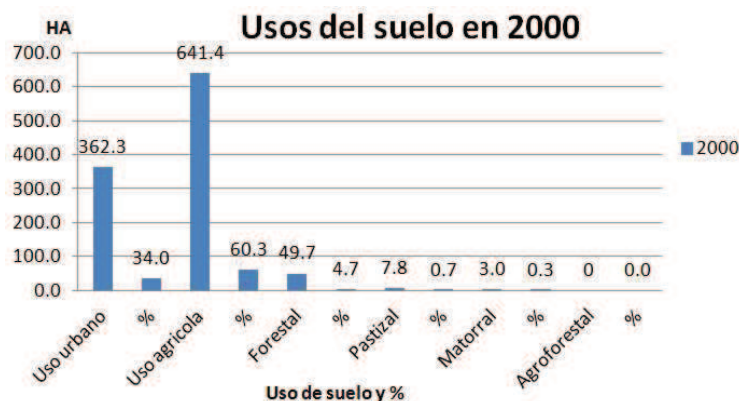
Plano 4.2.2.a. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 1997. Elaboración propia.

4.2.3. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 2000

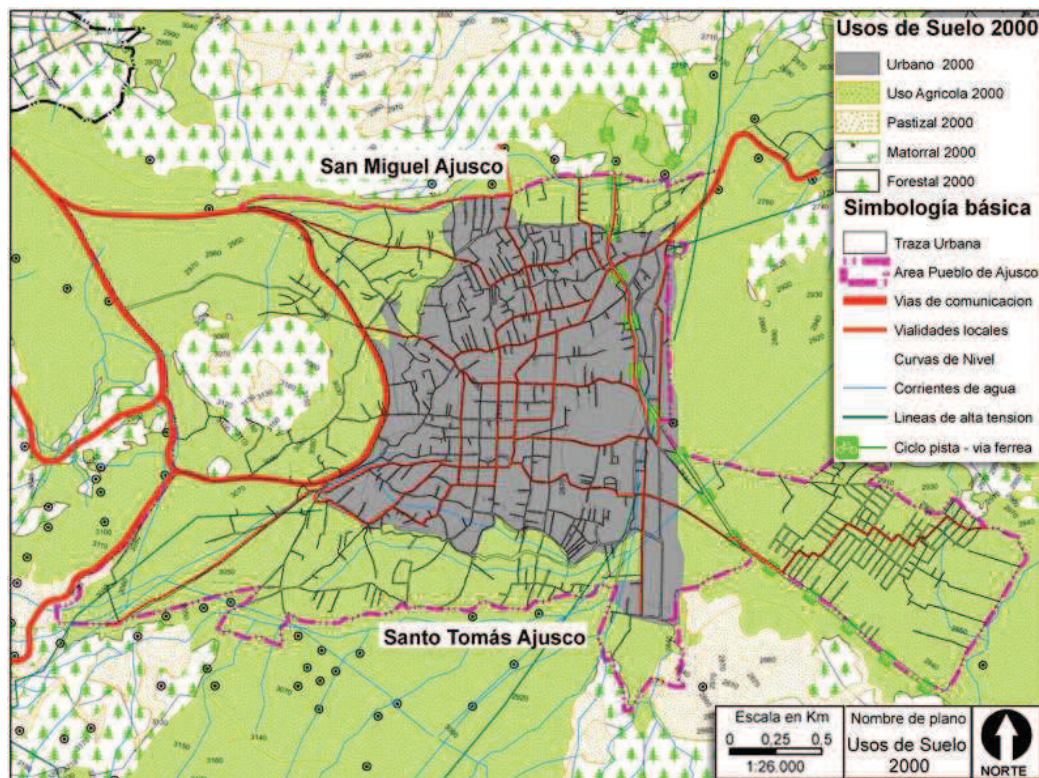
En el año 2000 el área urbana creció hasta el 34.0%, es decir en 3 años se incrementó en 4.5%. El suelo agrícola decreció hasta el 60.3, es decir, perdió 4.5% con respecto al año de 1997. Los otros usos del suelo permanecieron con el mismo porcentaje. Ver la tabla, gráfica y plano 4.2.3.a.

	Uso urbano	Uso agrícola	Forestal	Pastizal	Matorral	Agroforestal
2000	362.3	641.4	49.7	7.8	3.0	-
%	34.0	60.3	4.7	0.7	0.3	-

Tabla 4.2.3.a. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 2000. Elaboración propia.



Gráfica 4.2.3.a. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 2000. Elaboración propia.



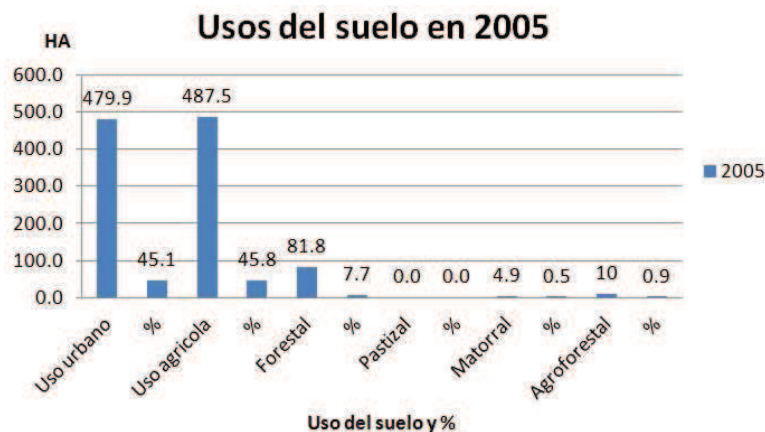
Plano 4.2.3.a. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 2000. Elaboración propia.

4.2.4. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 2005

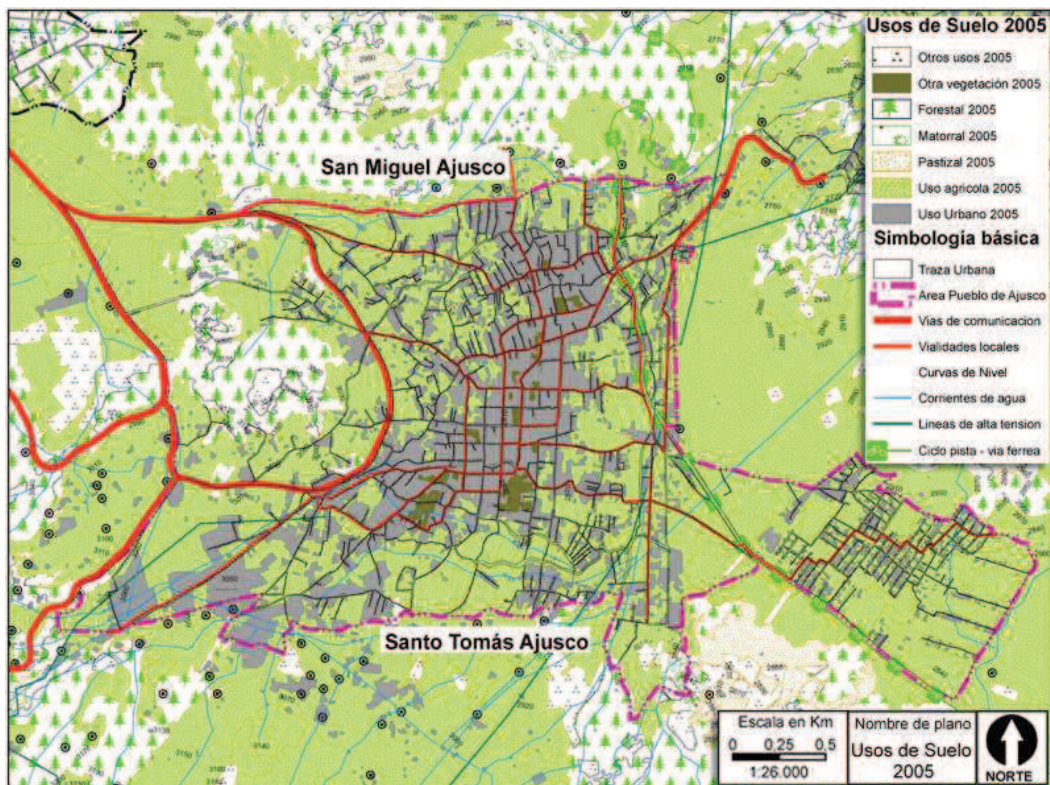
El área urbana creció hasta el 45.1%, en 5 años se incrementó en 11.1%. El suelo agrícola decreció hasta el 45.8%, en 5 años perdió 14.5%. El uso de suelo agroforestal tiene el 0.9% de la superficie. Ver la tabla, gráfica y plano 4.2.4.a.

	Uso urbano	Uso agrícola	Forestal	Pastizal	Matorral	Agroforestal
2005	479.9	487.5	81.8	0.0	4.9	10
%	45.1	45.8	7.7	0.0	0.5	0.9

Tabla 4.2.4.a. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 2005. Elaboración propia.



Gráfica 4.2.4.a. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 2005. Elaboración propia.



Plano 4.2.4.a. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 2005. Elaboración propia.

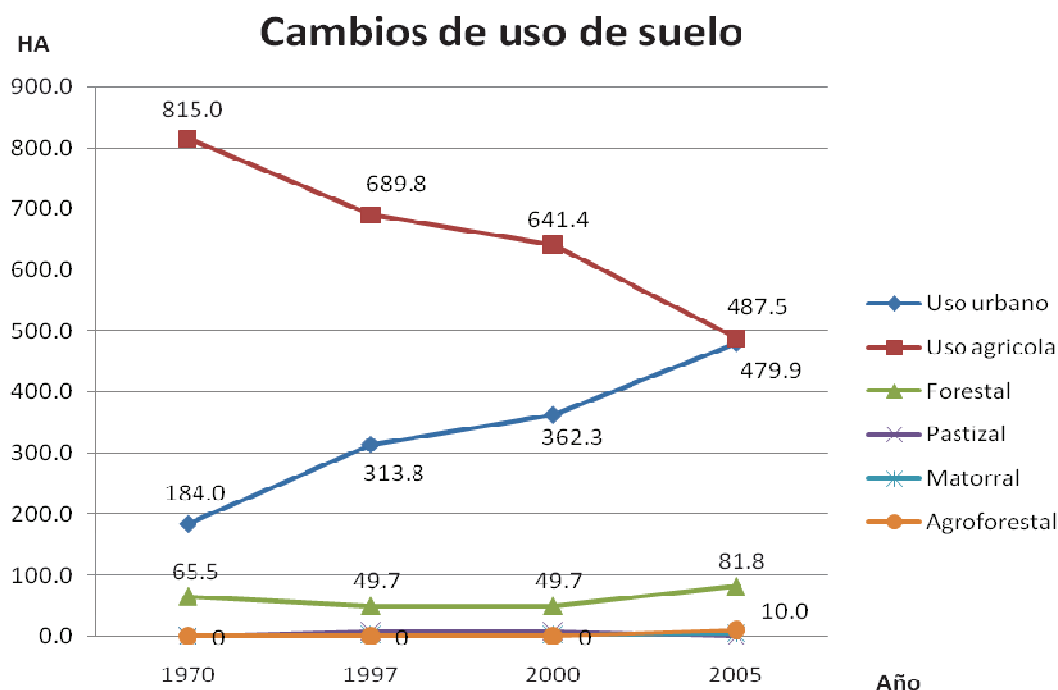
4.2.5. Comparación de los cambios de uso del suelo en los años 1970, 1997, 2000 y 2005 en el pueblo de Ajusco

En la tabla, gráfica y plano 4.2.5.a. se hace un resumen de los cambios de uso del suelo que ha tenido la zona de estudio desde el año de 1970 hasta el año 2005.

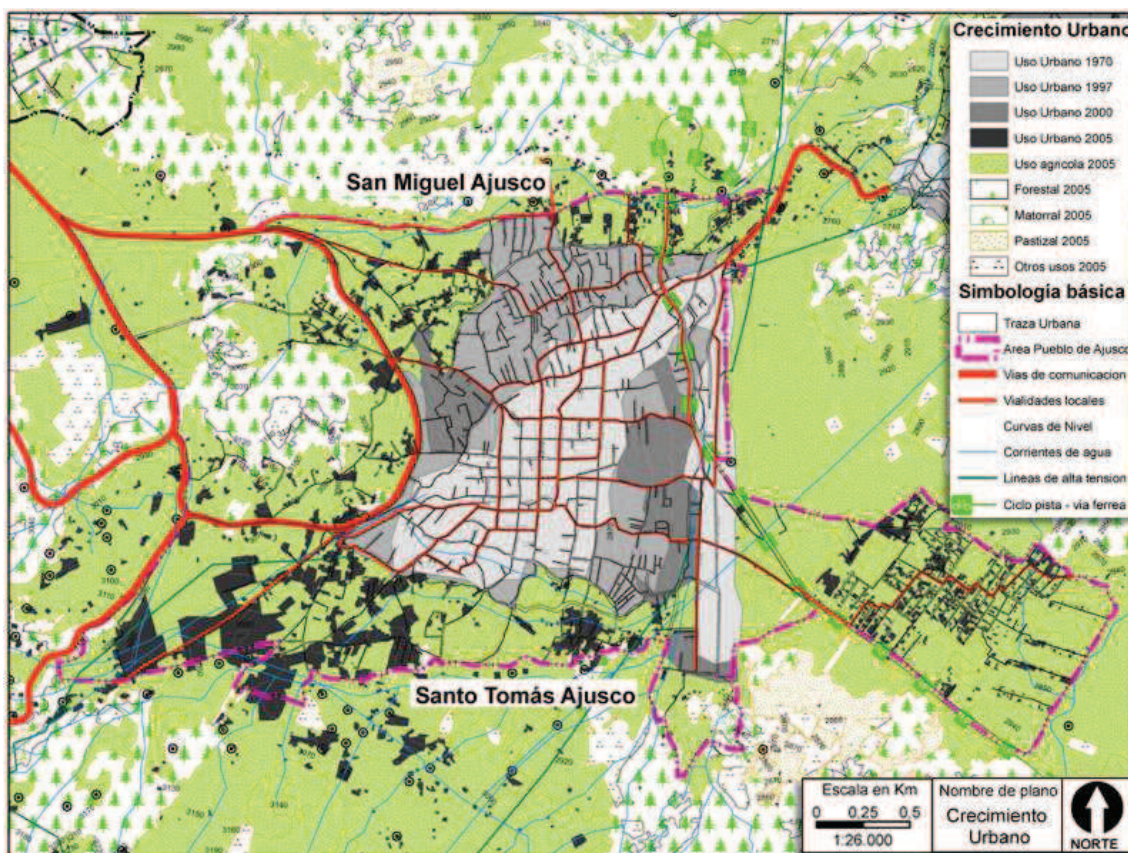
Resaltando el dato de los usos del suelo urbano y agrícola, ya que en el año de 1970 se tenía el 17.3% de uso urbano contra el 76.6% de uso agrícola y para el año de 2005 el uso urbano tenía el 45.1% y el agrícola tenía el 45.8%, es decir, en 35 años casi tienen el mismo porcentaje de área de estos dos usos, lo que indica la pérdida de la actividad económica principal de la zona (agrícola), y el aumento del área urbana.

Ha	Uso urbano	Uso agrícola	Forestal	Pastizal	Matorral	Agroforestal
1970	184.0	815.0	65.5	0.0	0.0	-
%	17.3	76.6	6.2	0.0	0.0	-
1997	313.8	689.8	49.7	7.8	3.0	-
%	29.5	64.8	4.7	0.7	0.3	-
2000	362.3	641.4	49.7	7.8	3.0	-
%	34.0	60.3	4.7	0.7	0.3	-
2005	479.9	487.5	81.8	0.0	4.9	10
%	45.1	45.8	7.7	0.0	0.5	0.9

Tabla 4.2.5.a. Cambios de los usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 1970, 1997, 2000 y 2005.
 Elaboración propia.



Gráfica 4.2.5.a. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 1970, 1997, 2000 y 2005.
 Elaboración propia.



Plano 4.2.5.a. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 1970, 1997, 2000 y 2005.
 Elaboración propia.

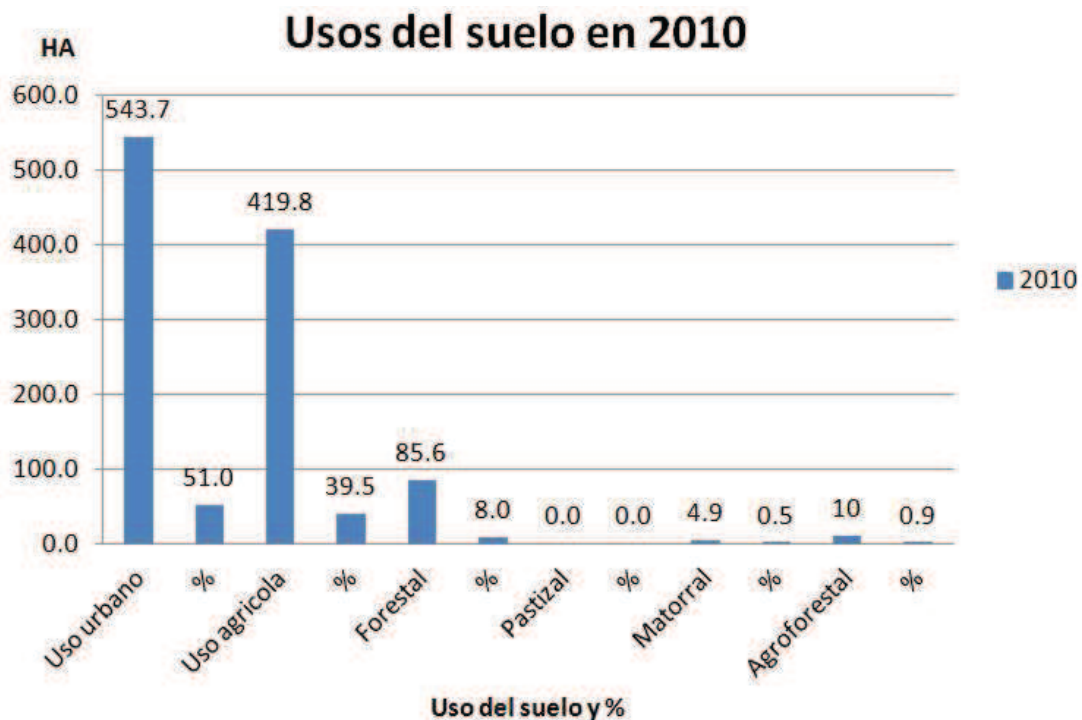
4.3. Usos de suelo urbano, agrícola, forestal, pastizal, matorral y agroforestal en 2010 (actuales)

Para la delimitación y el cálculo de la superficie de las áreas de los usos del suelo de la zona de estudio para el año del 2010 se utilizó una imagen aérea a través de Google Earth y sus herramientas de edición.

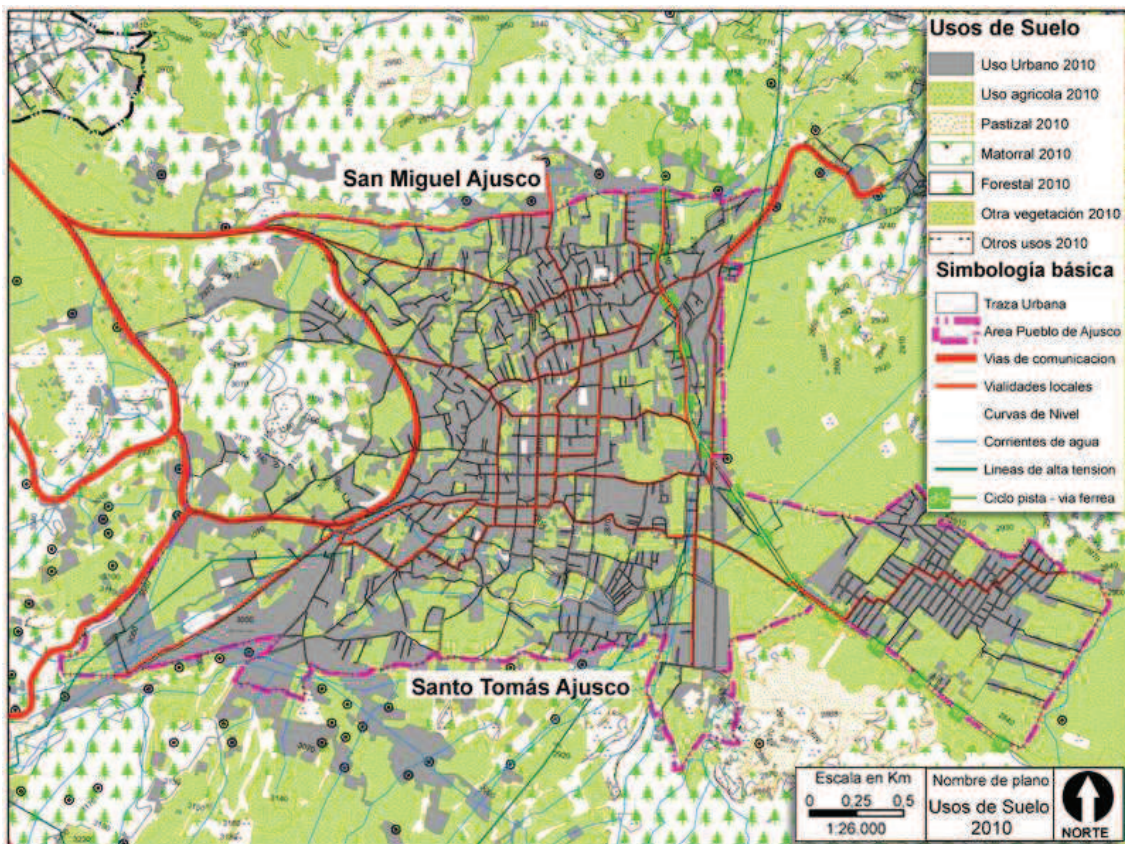
En el año de 2010 el área urbana se incrementó hasta el 51.0%, es decir en 5 años se incrementó en 5.9%. El uso de suelo agrícola decreció hasta el 39.5%, es decir en 5 años perdió 6.3% con respecto al año de 2005. Los demás usos del suelo permanecieron constantes. Ver la tabla, gráfica y plano 4.3.a.

Ha	Uso urbano	Uso agrícola	Forestal	Pastizal	Matorral	Agroforestal
2010	543.7	419.8	85.6	0.0	4.9	10
%	51.0	39.5	8.0	0.0	0.5	0.9

Tabla 4.3.a. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 2010.
 Elaboración propia.



Gráfica 4.3.a. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 2010. Elaboración propia.



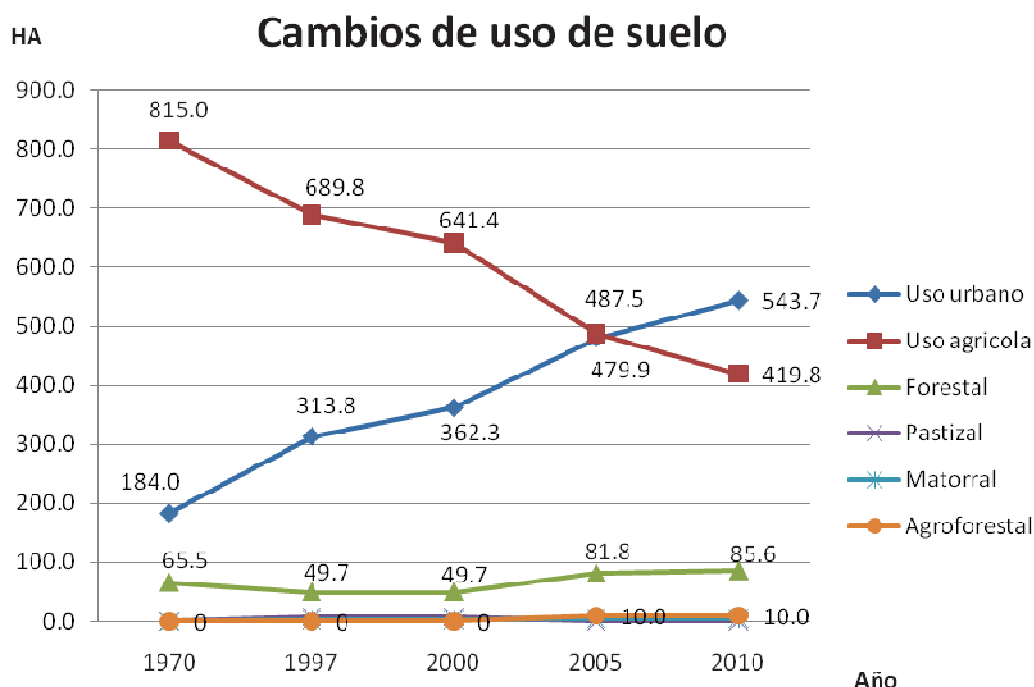
Plano 4.3.a. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 2010. Elaboración propia.

En la tabla, gráfica y plano 4.3.b. se hace un resumen de los cambios de usos del suelo y crecimiento urbano que ha tenido la zona de estudio desde el año de 1970 hasta el año 2010.

Cabe hacer notar que el área del uso de suelo urbano en 2010 ya es más de la mitad de toda la superficie, con un 51.0 % y el uso agrícola tiene el 39.5% de la zona de estudio y en 1970 el uso urbano solo era el 17.3% y el uso agrícola tenía el 76.6% del área, lo que indica un cambio en las actividades económicas importante. Como nota de esta investigación, en el Programa Delegacional de Desarrollo Urbano del 2010 de la Delegación de Tlalpan se consideraba todavía la zona de estudio como Pueblo Rural.

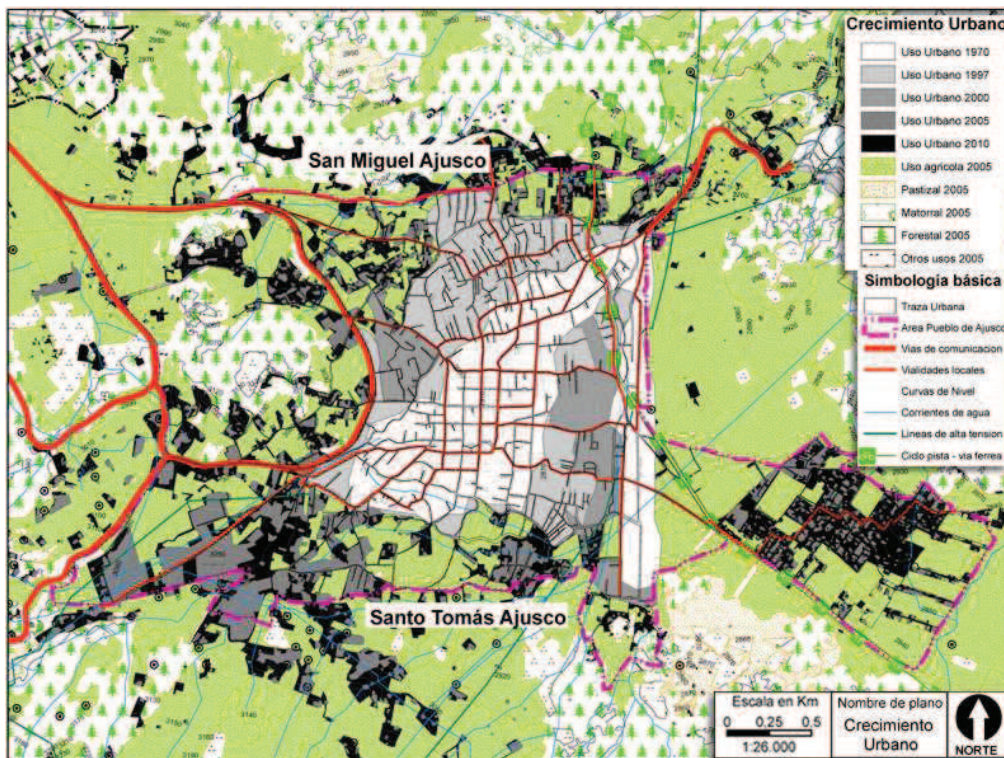
Ha	Uso urbano	Uso agrícola	Forestal	Pastizal	Matorral	Agroforestal
1970	184.0	815.0	65.5	0.0	0.0	-
%	17.3	76.6	6.2	0.0	0.0	-
1997	313.8	689.8	49.7	7.8	3.0	-
%	29.5	64.8	4.7	0.7	0.3	-
2000	362.3	641.4	49.7	7.8	3.0	-
%	34.0	60.3	4.7	0.7	0.3	-
2005	479.9	487.5	81.8	0.0	4.9	10
%	45.1	45.8	7.7	0.0	0.5	0.9
2010	543.7	419.8	85.6	0.0	4.9	10
%	51.0	39.5	8.0	0.0	0.5	0.9

Tabla 4.3.b. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 1970, 1997, 2000, 2005 y 2010.
 Elaboración propia.



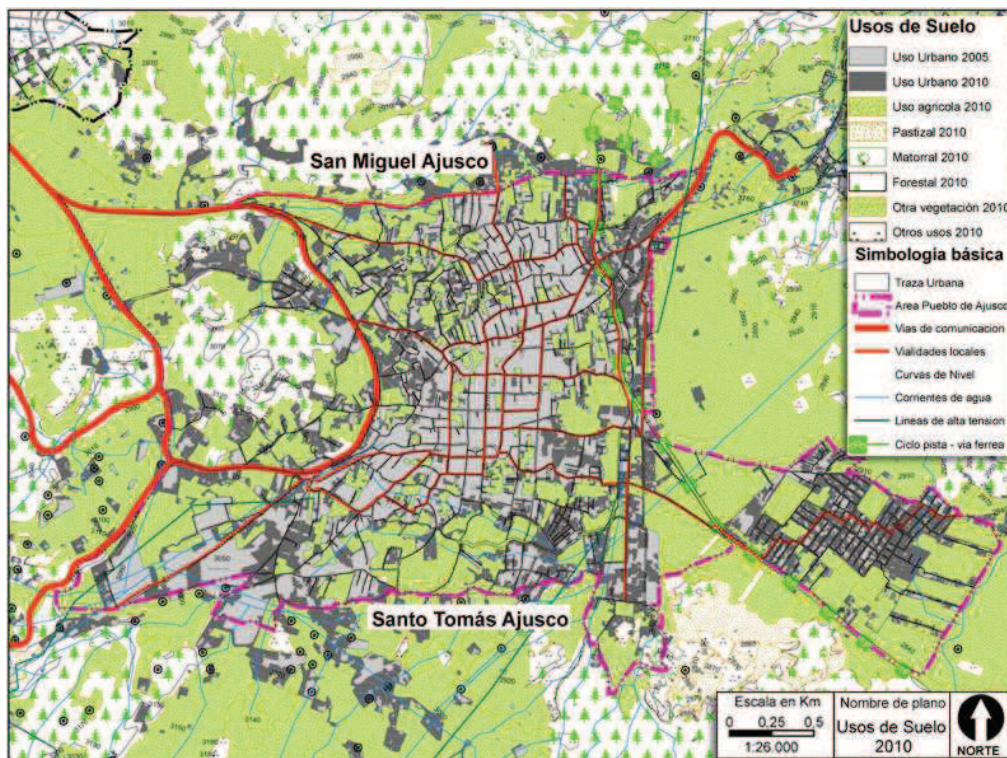
Gráfica 4.3.b. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 1970, 1997, 2000, 2005 y 2010.
 Elaboración propia.

Modelado y simulación de sistemas urbanos complejos basado en autómatas celulares.
Caso de estudio: Los cambios de usos del suelo y crecimiento urbano en el pueblo de Ajusco



Plano 4.3.b. Usos del suelo en los años: 1970, 1997, 2000, 2005 y 2010. Elaboración propia.

En el plano 4.3.c. se hace una comparación del área urbana del 2005 y el 2010.



Plano 4.3.c. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 2005 y 2010. Elaboración propia.

4.4. Modelado

En este apartado se definen los aspectos que componen el modelo de los cambios de usos de suelo establecidos por Roger White (White, 1996), a partir de la información obtenida para el año 2005.

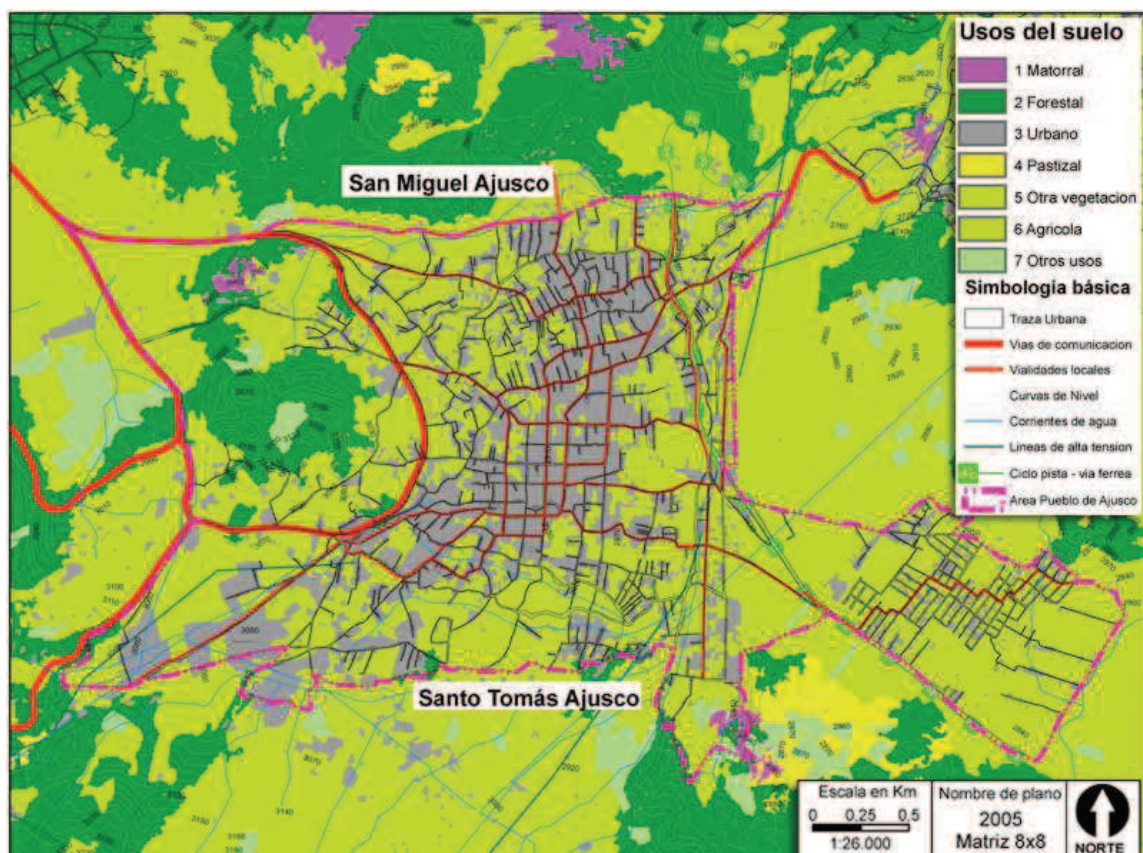
4.4.1. Espacio celular

El primer aspecto que se debe definir del autómata celular es el espacio celular del mismo.

Es decir, se define el área que va a comprender el lugar de estudio, en este caso es el pueblo de Ajusco (San Miguel y Santo Tomás) y sus alrededores.

Por cuestiones de frontera de los AC se definió un área rectangular más grande que la zona del pueblo de Ajusco.

El espacio está definido por las coordenadas $19^{\circ}14'28.22''$ N y $99^{\circ}14'01.07''$ O en la parte superior izquierda y por las coordenadas $19^{\circ}11'53.12''$ N y $99^{\circ}10'07.34''$ O en la parte inferior derecha, con lo que se define un rectángulo de 8000 m de ancho y 6000 m de alto. Ver plano 4.4.1.a.



Plano 4.4.1.a. Definición del espacio celular. Elaboración propia.

Además de delimitar el área para el espacio celular, es necesario definir el tamaño de la célula.

A continuación se muestra un análisis para determinar el tamaño de la célula.

Area total: 8000 m x 6000 m		2 x 2	4 x 4	8 x 8	16 x 16	32 x 32
Tamaño de celda en metros						
Dimensión matriz	4000 x 3000	2000 x 1500	1000 x 750	500 x 375	250 x 188	
Total de células	12,000,000	3,000,000	750,000	175,000	47,000	
Total de operaciones:						
Radio 6: White (112 celdas)	1,344,000,000	336,000,000	84,000,000	19,600,000	5,264,000	
Radio 6: Moore (121 celdas)	1,452,000,000	363,000,000	90,750,000	21,175,000	5,687,000	

Tabla 4.4.1.a. Definición del tamaño de la célula
 Elaboración propia.

En este caso, se va a utilizar una célula de 8 por 8 metros, debido principalmente a la resolución de las vialidades, ya que si se utilizaba una célula de mayor tamaño el efecto de empaste era muy grande y se perdían detalles en los usos de suelo de la zona central. Se muestra un ejemplo del nivel de detalle que se alcanza con una célula de 8 m x 8 m., en la imagen 4.4.1.b. y en la imagen 4.4.1.c se muestra el original en formato shp de la misma zona.

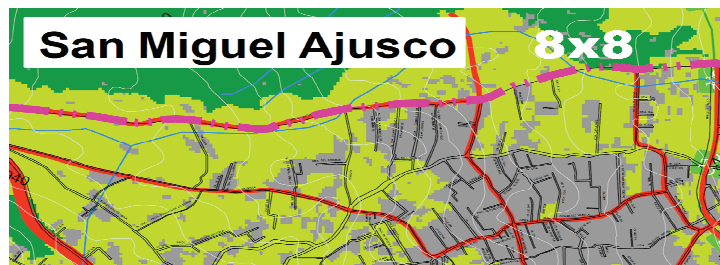


Imagen 4.4.1.b. Definición del tamaño de la célula de 8m x 8m, imagen en formato raster.
 Elaboración propia.

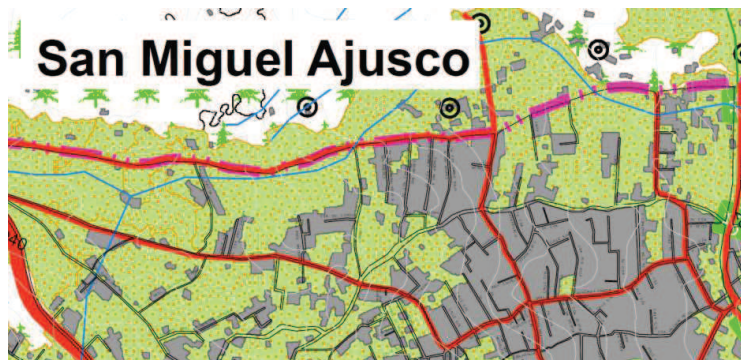
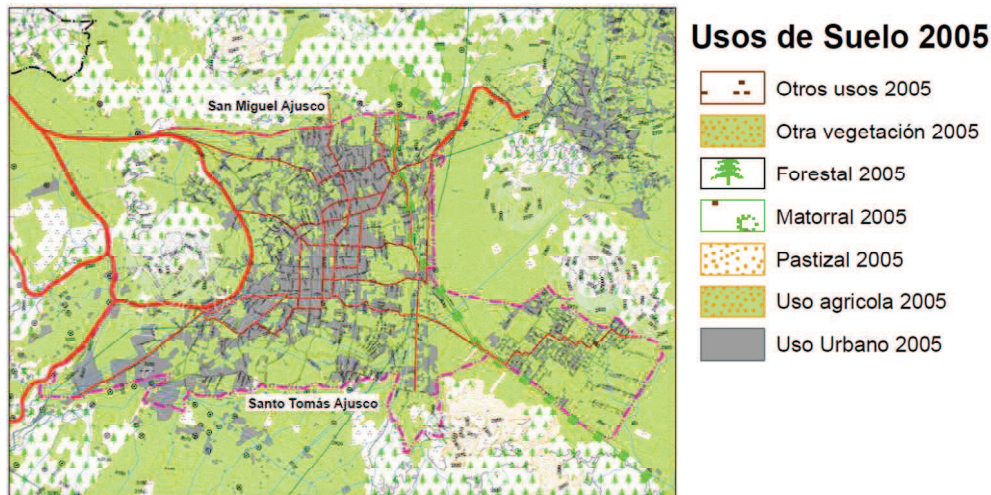


Imagen 4.4.1.c. Imagen en formato shp. Elaboración propia.

4.4.2. Conjunto de estados (usos del suelo: urbano, agrícola, forestal, pastizal, matorral, agroforestal y vial)

El conjunto de estados está definido por los tipos de usos del suelo del área de estudio que se determinaron en el año de 2005. Así, los estados dinámicos son: uso urbano, agrícola, forestal, pastizal, matorral, otra vegetación y otros usos. Los estados estáticos están determinados por la vialidad de la zona. Plano 4.4.2.



Plano 4.4.2. Definición del conjunto de estados. Elaboración propia.

4.4.3. Vecindad (Moore: radio de 6 celdas)

Existen varios autores que proponen la vecindad para la modelación, en este caso se muestran dos alternativas, cada una define la forma de la vecindad y el número de células de esa vecindad.

El primer caso, el tipo de vecindad es el que propone White (White, 1996), en el que define un radio de 6, con lo que se tienen 112 células vecinas, teniendo una forma semicircular. Imagen 4.4.3.a. En el segundo caso, el tipo de vecindad es del tipo de Moore extendida⁴, donde se propone un área cuadrada con 11 celdas por lado, con lo que dan 121 celdas vecinas. Imagen 4.4.3.b.

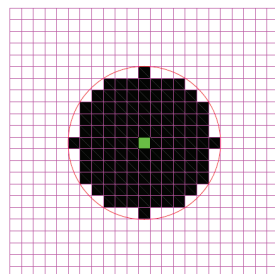


Imagen 4.4.3.a.

Vecindad propuesta por Roger White.

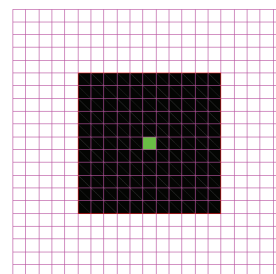
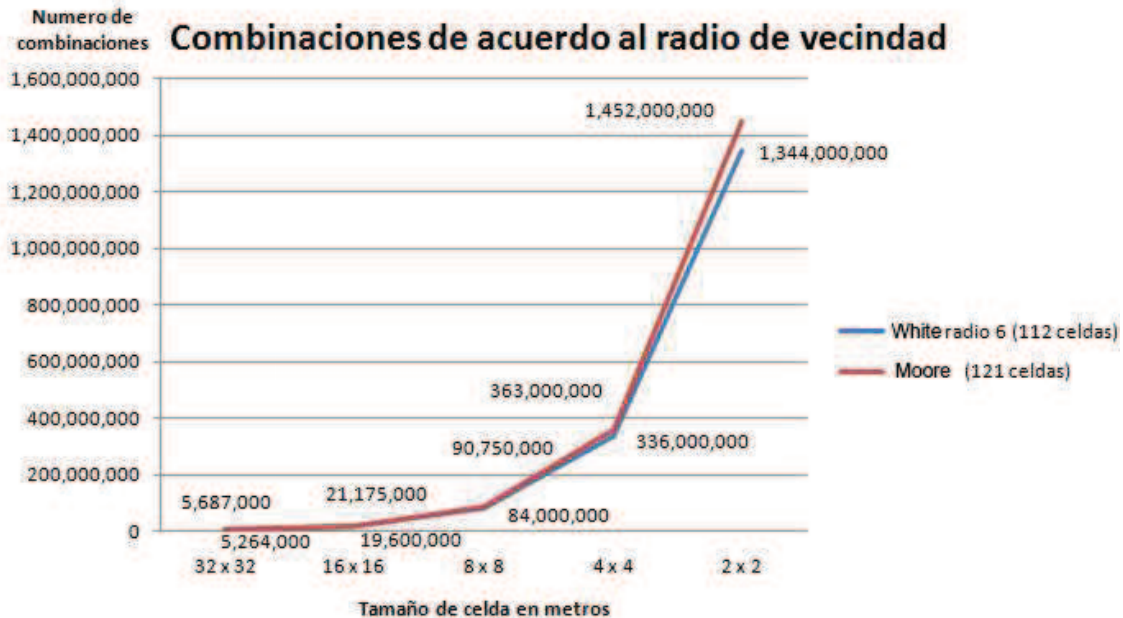


Imagen 4.4.3.b.

Vecindad propuesta por Moore.

⁴ <http://mathworld.wolfram.com/MooreNeighborhood.html>

En base al espacio celular y al tipo de vecindad analizada, se realizó la siguiente gráfica, en donde podemos ver que a menor tamaño de la célula y mayor el número de células vecinas, aumenta exponencialmente la cantidad de operaciones requeridas para el cálculo del autómata. Gráfica 4.4.3.



Gráfica 4.4.3. Numero de operaciones de acuerdo al tamaño de la célula y la vecindad.
 Elaboración propia.

Del análisis anterior se puede observar que es indistinto usar una vecindad u otra ya que son similares el número de cálculos realizados, así que se determinó utilizar la vecindad del tipo Moore extendida, con un radio de 6 y con un tamaño de la célula de 8 metros por 8 metros.

4.4.4. Función de transición (White, 1996)

La función de transición es la propuesta por Roger White, para el cálculo del potencial del cambio de uso del suelo.

La función sirve para calcular un vector de potenciales de transición para cada celda activa, esto es, aquellas celdas que tienen estados activos. Luego se aplica la regla de transición, esto es, se cambia el estado de cada celda al estado para el cual tiene el más elevado potencial.

La fórmula del modelo de White es:

$$P_{hj} = va_j^s j (1 + \sum_k \sum_i \sum_d m_{kd} I_{id}) + H_j$$

Para una descripción detallada de la función de transición de White, ver el capítulo 2, en el apartado 2.4.3.

4.5. Simulación

4.5.1. Introducción

Una vez que se determinaron los cuatros aspectos que definen al AC, es decir:

1. **Espacio celular:** área de 8000 metros por 6000 metros, con un tamaño celular de 8 metros por 8 metros, matriz de 1000 x 750 elementos. Ver plano 4.4.1.a.
2. **Vecindad:** Definida por un radio de 6 celdas de tipo Moore. Ver gráfica 4.4.1.c.
3. **Estados:** Usos del suelo urbano, agrícola, forestal, pastizal, matorral, agroindustrial (dinámicos) y vial (estático). Ver gráfica 4.4.1.d.
4. **Función de transición:** Función de White para el cálculo de probabilidad del cambio de uso de suelo. Ver gráfica 4.4.1.e.

Se procedió a la implementación del modelo de White, para ello, se utilizó el entorno de desarrollo de NetLogo para programar el modelo y generar la simulación. Ver Anexo A.1 para una descripción de NetLogo.

Se utilizó NetLogo por tener un IDE integrado, es multiplataforma (java), un entorno de visualización integrado, posee herramientas para la construcción de interfaces gráficas y existe gran documentación técnica.

En las imágenes 4.5.1.a. y 4.5.1.b. se muestra la interfaz desarrollada para el modelo del AC, en donde se implementaron los cuatro factores que intervienen el modelo de White.

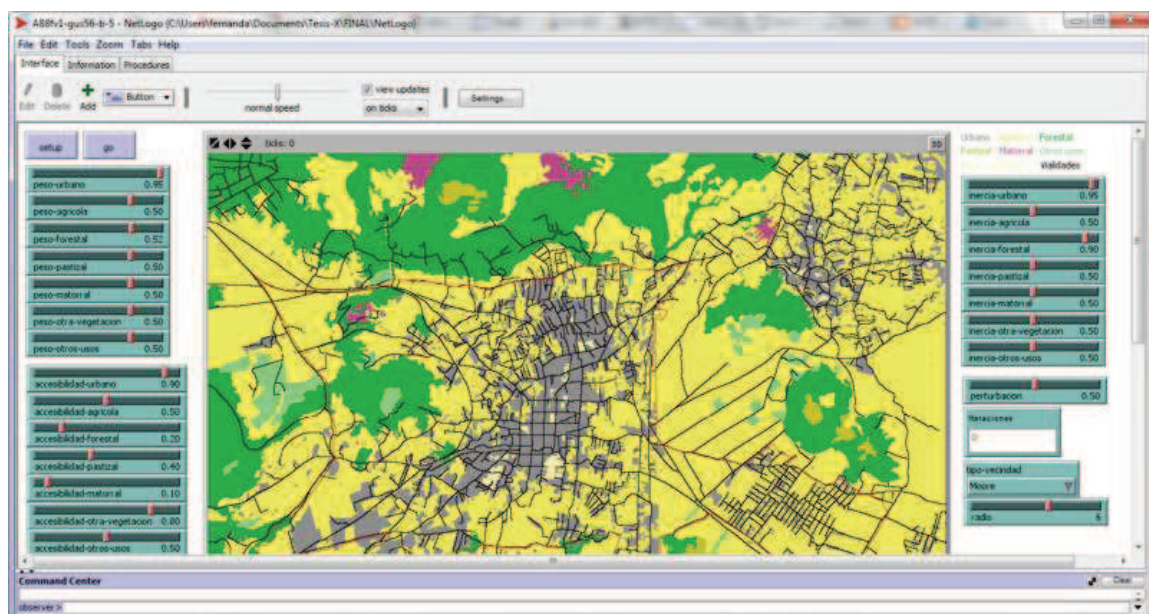


Imagen 4.5.1.a. Espacio celular de 8x8m y contorno del pueblo de Ajusco en NetLogo

Modelado y simulación de sistemas urbanos complejos basado en autómatas celulares.
 Caso de estudio: Los cambios de usos del suelo y crecimiento urbano en el pueblo de Ajusco

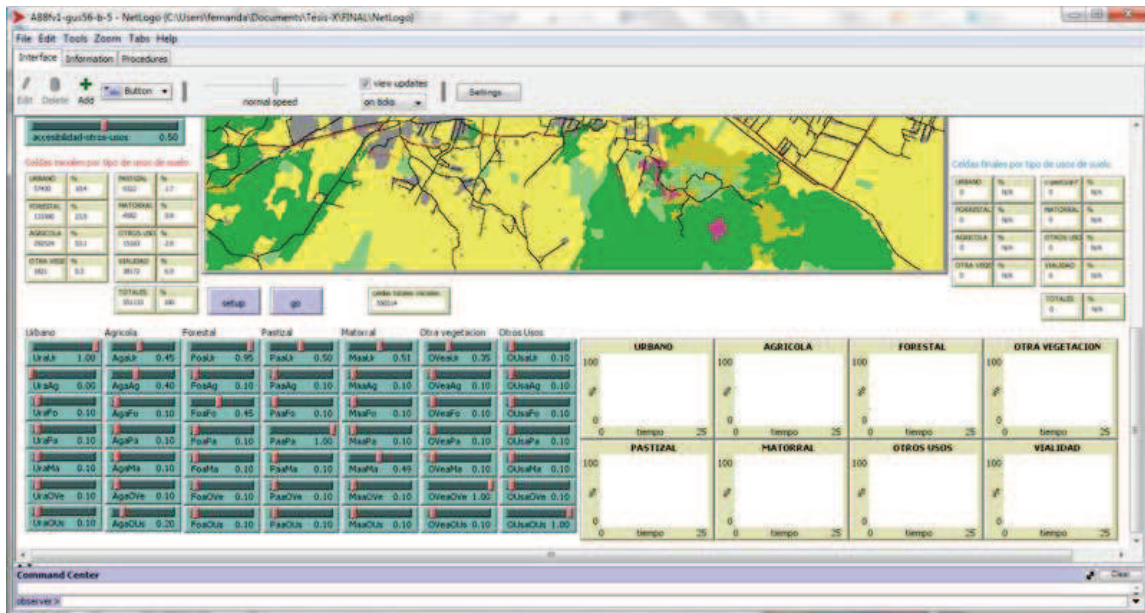


Imagen 4.5.1.b. Diseño de la interface en NetLogo

A continuación se describirán cada uno de los factores y sus valores

4.5.1.1. Accesibilidad

El efecto de la accesibilidad local puede tomar valores entre 0 y 1, y que representa la facilidad de acceso a la red de transporte, es decir, como factor de conveniencia con respecto a ciertas actividades socioeconómicas.

En este caso, la accesibilidad urbana tiene el mayor valor de 0.90, lo que indica que una célula tiene mayor probabilidad de cambiar o permanecer con el uso de suelo urbano si se tiene cercanía con alguna o algunas vías de comunicación. No se le dio el valor de 1.0 ya que se detectó que existen construcciones urbanas sin que exista una vialidad relativamente cercana.

El uso de suelo otra vegetación tiene un valor 0.80 (el segundo mayor) ya que este representa principalmente lotes baldíos dentro de la zona urbana.

El uso agrícola tiene un valor de 0.50, lo que indica que es necesario para esta actividad contar con una comunicación adecuada, ya sea para el transporte de productos que se cultivan en ella o para el transporte de personas que trabajan en ella.

El uso de suelo clasificado como “Otros usos” se refiere a la actividad agroindustrial o invernaderos, por lo que se le dio un valor de 0.50 igual al agrícola ya que esta actividad se realiza en áreas agrícolas.

Al uso de suelo de pastizal se le dio un valor de 0.40 ya que éste se usa para pastoreo de ganado, principalmente vacas, ovejas y cabras.

Al uso de suelo forestal se le dio un valor de 0.13 ya que en estas zonas existen muy pocas vías de comunicación, y esto es entendido ya que las actividades en estas aéreas son muy pocas.

Finalmente al uso de suelo clasificado como matorral se le dio un valor de 0.10 ya que éste se localiza en zonas muy apartadas de las vías de comunicación.

Estos valores fueron definidos tras diversas pruebas y con el conocimiento de las actividades de la zona de estudio. Ver tabla 4.5.1.1.

Uso de suelo	Valor de accesibilidad
Urbano	0.90
Otra vegetación	0.80
Agrícola	0.50
Otros usos	0.50
Pastizal	0.40
Forestal	0.13
Matorral	0.10

Tabla. 4.5.1.1. Valor de la accesibilidad.

4.5.1.2. Peso de los usos de suelo

El factor de peso indica que entre más se acerque a 1 el uso de suelo tiene una mayor influencia o de atracción en sus vecinos, aunque puede tomar valores negativos, lo que significa que si se acerca más a -1 la influencia es menor o de repulsión. Los valores van de -1 a 1.

El peso que se le dio al uso urbano fue de 0.95 lo que indica que cada calda de éste uso de suelo tiene una influencia mayor que todos los otros usos de suelo.

El peso que se le dio al uso forestal fue de 0.52, lo que indica que el único uso de suelo que tiene una influencia mayor de cambio es el urbano.

A los otros usos de suelo se les dio un peso 0.5. Esto valores fueron definidos después de varias pruebas para calibrar el modelo. Ver tabla 4.5.1.2.

Uso de suelo	Peso del uso de suelo
Urbano	0.95
Forestal	0.52
Agrícola	0.50
Otros usos	0.50
Pastizal	0.50
Otra vegetación	0.50
Matorral	0.50

Tabla. 4.5.1.2. Valor del peso de los usos de suelo.

4.5.1.3. Inercia de los usos de suelo

Indica la probabilidad de que una celda permanezca en su estado actual o uso de suelo. Los valores que puede tomar van de 0 a 1.

Al suelo urbano se le dio una inercia de 0.95 lo que indica que tiene la mayor probabilidad (95%) entre todos los usos de suelo de que no cambie su estado.

Al uso forestal se le dio una inercia de 0.90 lo que indica que tiene un 90% de probabilidad de permanecer en su estado o uso de suelo y solo puede ser cambiado por el uso de suelo urbano.

Al uso agrícola se le dio un valor de 0.5 lo que indica que tiene el 50% de probabilidad de que cambie su estado o uso de suelo. Los otros usos de suelo se les asignaron un valor de inercia de 0.5. Ver tabla 4.5.1.3.

Uso de suelo	Inercia del uso de suelo
Urbano	0.95
Forestal	0.90
Agrícola	0.50
Otros usos	0.50
Pastizal	0.50
Otra vegetación	0.50
Matorral	0.50

Tabla. 4.5.1.3. Valor de la inercia de los usos de suelo.

4.5.1.4. El potencial de transición

El potencial de transición refleja la aptitud intrínseca de la celda para cada uno de los usos del suelo activos y el efecto global de los diferentes usos del suelo dentro de su vecindad de la célula, algunos usos del suelo son incompatibles como vecinos, otros se refuerzan mutuamente. Puede tomar valores entre 0 y 1.

Estos valores fueron definidos después de varias pruebas para calibrar el modelo, se pueden ver como una matriz, como se muestra en la tabla 4.5.1.4.

	Urbano	Agrícola	Forestal	Pastizal	Matorral	Otra Vegetación	Otros usos
Urbano	1.00	0.45	0.95	0.50	0.51	0.35	0.10
Agrícola	0.00	0.40	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Forestal	0.10	0.10	0.45	0.10	0.10	0.10	0.10
Pastizal	0.10	0.10	0.10	1	0.10	0.10	0.10
Matorral	0.10	0.10	0.10	0.10	0.49	0.10	0.10
Otra Vegeta.	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	1.00	0.10
Otros usos	0.10	0.20	0.10	0.10	0.10	0.10	1.00

Tabla. 4.5.1.4. Matriz de potencial de transición

4.5.1.5. Perturbación estocástica o valor de ν

Este parámetro solo depende del valor de α , se dejó un valor medio, o sea de 0.5 lo que indica que el 50% de los actores conocen el estado del sistema, puede tomar valores de 0 a 1. Ver imagen 4.5.1.5.



Imagen 4.5.1.5. Valor de α para el cálculo de ν

4.5.1.6. Tipo de vecindad y radio

Los últimos dos factores que se definieron para el modelo de White y poder generar la simulación fueron el tipo de vecindad que en éste caso se usó la del tipo Moore extendida y con un radio de 6. Ver imagen 4.5.1.6. Como parte del diseño de la interfaz, el radio puede tomar valores de 0 a 10, para que se pueda experimentar cambiando este parámetro. Además se tiene la posibilidad de escoger el tipo de vecindad, ya sea la del tipo Moore o la del tipo Von Neumann.

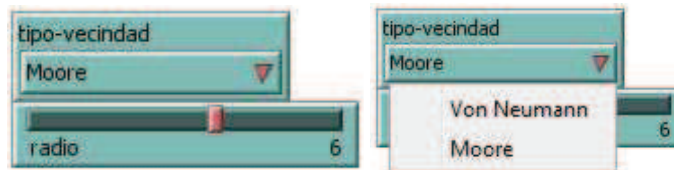


Imagen 4.5.1.6. Tipo de vecindad y el radio

4.5.1.7. Programación

En la imagen 4.5.1.7., se muestra una parte de la programación del modelo de White. Ver Anexo 3, donde se muestra el programa completo, escrito en NetLogo.



Imagen 4.5.1.7. Sección de la programación en NetLogo

4.5.2. Simulación para el año 2010

A continuación se mostraran los resultados de la simulación realizada a partir de los datos de 2005 sobre la zona de estudio de San Miguel y Santo Tomás Ajusco (SMSTA).

El modelo se corrió 5 ciclos, cada ciclo realizo 551133 cálculos de potencial de cambio de uso de suelo. El área de tienen 551133 celdas dinámicas.

Por mediciones en las áreas de los usos de suelo en los distintos ciclos y comparándolos con los datos reales de la zona para el año 2010, se dividió la zona en dos partes, una se denominó zona central y otra como zona de La Venta, encontrándose el siguiente patrón:

Para simular o predecir los cambios de uso de suelo de San Miguel y Santo Tomás Ajusco de la zona central u original para el año 2010 se utilizó la simulación del ciclo 1 y para la zona de La Venta, la cual presenta un ritmo de crecimiento mucho mayor, se utilizó la simulación del ciclo 3.

Para simular el año 2015 se utilizaron los datos generados por el ciclo 2 para la parte central y los datos del ciclo 4 para la zona de la Venta.

Para simular el año 2020 se utilizaron los datos generados por el ciclo 3 para la parte central y los datos del ciclo 5 para la zona de la Venta.

Así se tiene la tabla 4.5.2.a.

Año	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5
2010	SMST		La venta		
2015		SMST		La venta	
2020			SMST		La venta

Tabla. 4.5.2.a. Relación de ciclo con el año simulado por zona

Lo anterior se debe principalmente a la implementación que se hizo del modelo, en donde, en cada iteración se calculan todos los potenciales de cada célula o celda, es decir las células evolucionan de forma sincrónica entre intervalos de tiempo, en donde los cambios se aplican de manera uniforme: todas las celdas se actualizan al mismo tiempo.

Para tener un resultado directo, se debe implementar una técnica de actualización asincrónica de células. Éste es una actividad pendiente para próximos trabajos.

En la imagen 4.5.2.a., se muestra el mapa base con los diferentes usos de suelo en 2005, así como la zona central de SMSTA y la zona de la Venta.

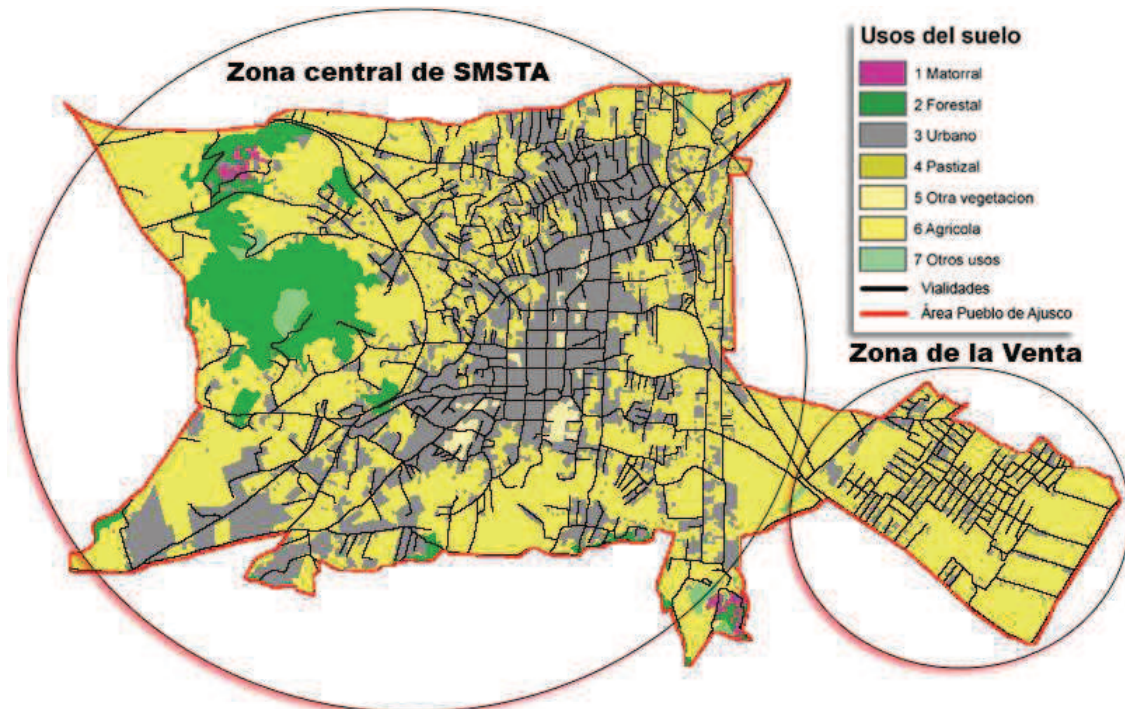


Imagen 4.5.2.a. Usos de suelo en SMSTA en 2005, zona central y de la Venta, reales.
Elaboración propia.

En la Imagen 4.5.2.b., se muestra el mapa con los diferentes usos de suelo en 2010 observados o reales de la zona de estudio.

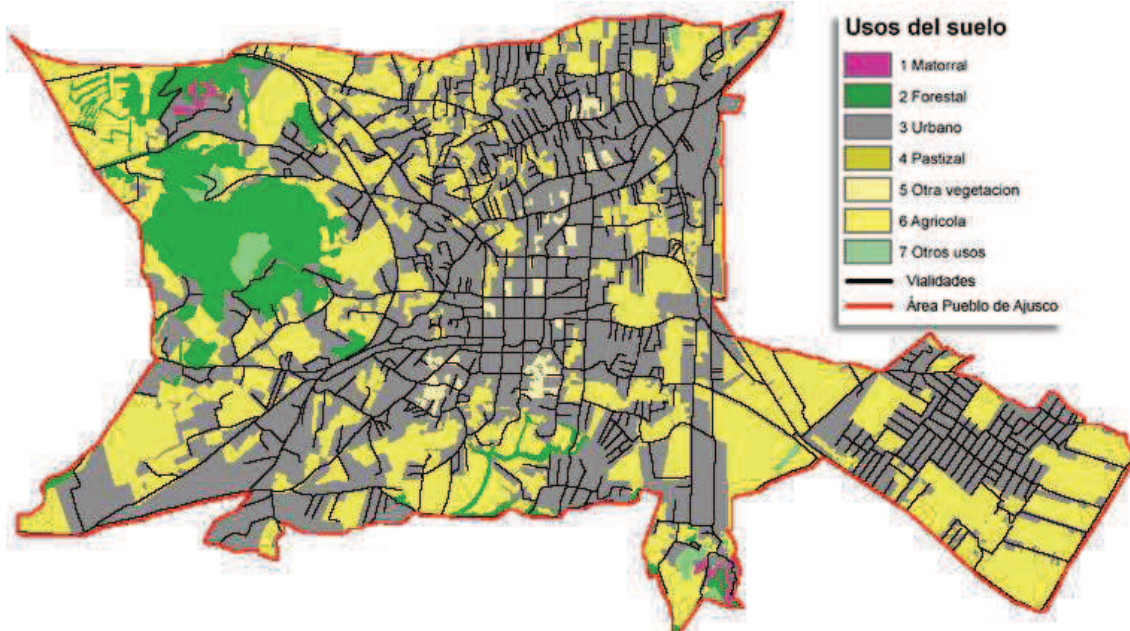


Imagen 4.5.2.b. Usos de suelo en SMSTA en 2010, reales. Elaboración propia.

En la imagen 4.5.2.c. se muestra el mapa con los diferentes usos de suelo en 2010 simulados o predichos de la zona de estudio.

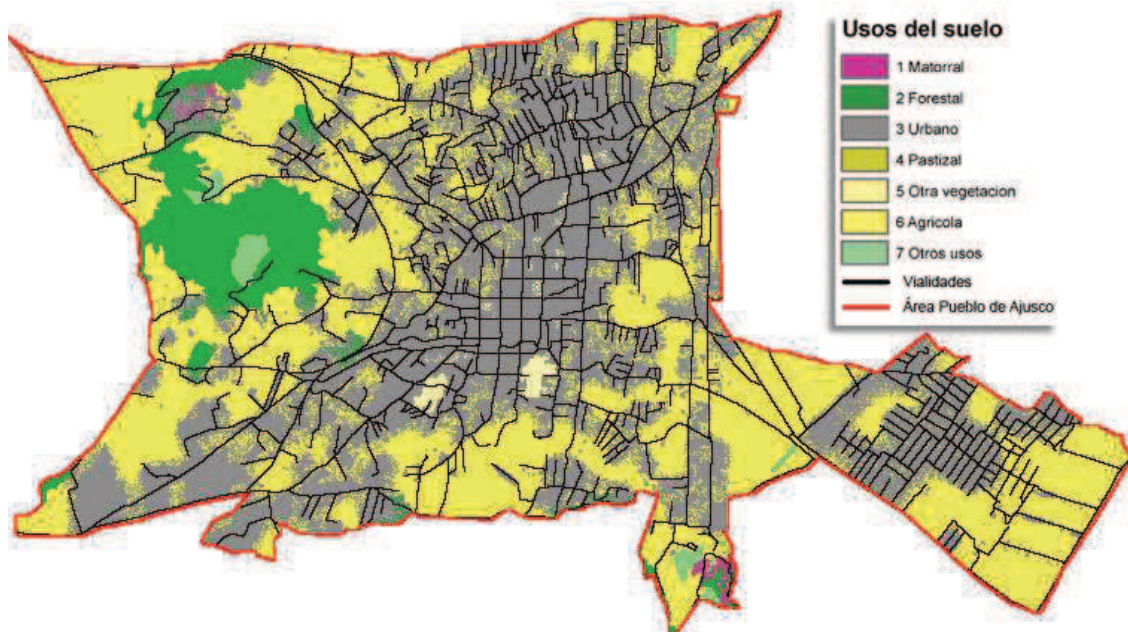


Imagen 4.5.2.c. Usos de suelo en SMSTA en 2010, simulados. Elaboración propia.

En la imagen 4.5.2.d. se muestra una comparativa a nivel visual de los planos del año 2010 real u observado y del año 2010 simulado o predicho, generado a partir del plano del año 2005 real. Posteriormente en este mismo capítulo se hace un estudio para medir de manera cuantitativa la similitud entre los planos anteriores.

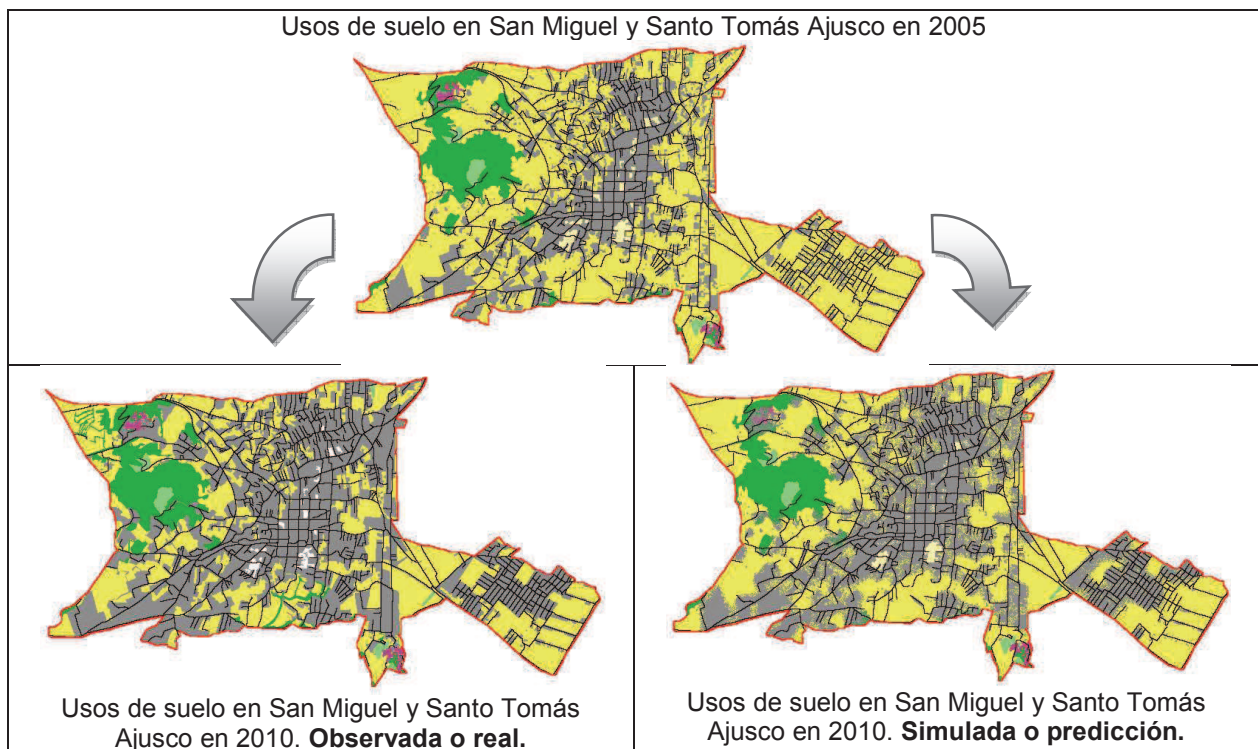


Imagen 4.5.2.d. Usos de suelo en SMSTA en 2010. Elaboración propia.

4.5.3. Simulación para los años 2015 y 2020

Se muestran los resultados de la simulación para el 2015 y 2020 de los cambios de usos del suelo en la tabla 4.5.3.a en porcentaje, que pueden ser utilizadas como herramienta para una planeación a corto y mediano plazo.

Uso	Urbano simulado (%)	Agrícola simulado (%)	Forestal simulado (%)	Pastizal Simulado (%)	Matorral Simulado (%)	Agroforestal Simulado (%)
2010	50.4	41.4	6.3	0.0	0.3	0.9
2015	60.8	32.4	5.2	0.0	0.2	0.9
2020	69.4	25.0	4.2	0.0	0.2	0.9

Tabla. 4.5.3.a. Cambios en los uso de suelo en los años 2010, 2015 y 2020

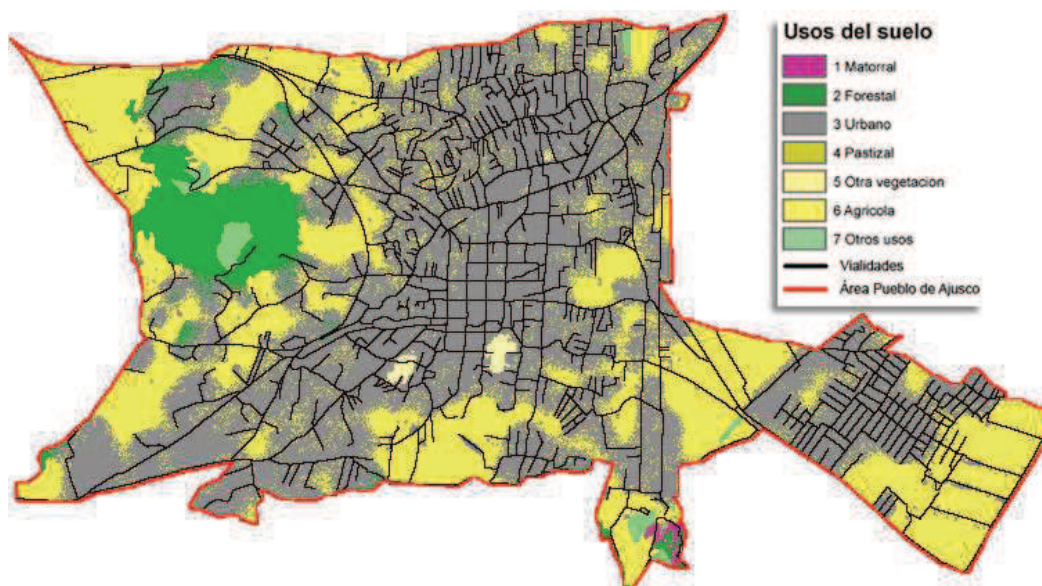


Imagen 4.5.3.a. Usos de Suelo en San Miguel y Santo Tomás Ajusco en 2015. Elaboración propia.

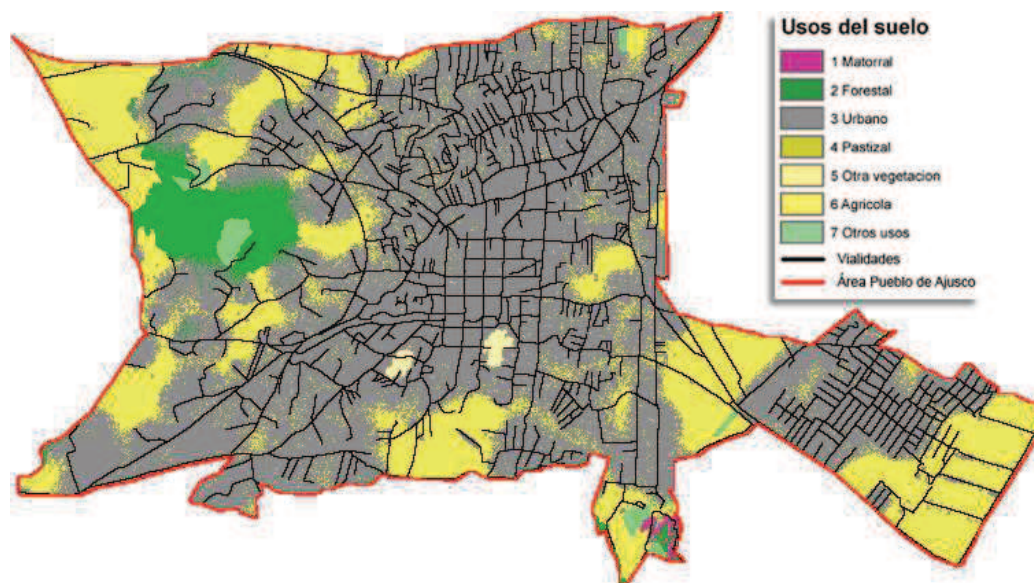


Imagen 4.5.3.b. Usos de Suelo en San Miguel y Santo Tomás Ajusco en 2020. Elaboración propia.

4.6. Resultados

4.6.1. Comparación de datos del 2010: reales con la simulación

En la tabla 4.6.1 se muestran los usos de suelo para el año 2010 tanto los reales como los simulados en porcentaje y las diferencias que se tienen para cada uso de suelo, las diferencias son mínimas, lo que indica un alto grado de confiabilidad del modelo y la simulación, posteriormente se darán otros parámetros para medir la similitud de las imágenes reales y simuladas.

Uso	Urbano real %	Urbano simulado %	Agrícola real %	Agrícola simulado %	Forestal real %	Forestal simulado %	Pastizal real %	Pastizal simulado %	Matorral real %	Matorral simulado %	Agroforestal real %	Agroforestal simulado %
2010	51.0	50.4	39.5	41.4	8.0	6.3	0.0	0.0	0.5	0.3	0.9	0.9
Dif.	0.6		1.9		1.7		0.0		0.2		0.0	

Tabla. 4.6.1. Comparación de datos reales y simulados para el año 2010.

4.6.2. Crecimiento simulado 2010, 2015 y 2020

En la imagen 4.6.2.a, se puede apreciar el crecimiento simulado que se da en la zona de estudio cada 5 años, es decir para los años 2010 (gris más claro), 2015 (gris medio) y 2020 (gris más oscuro)

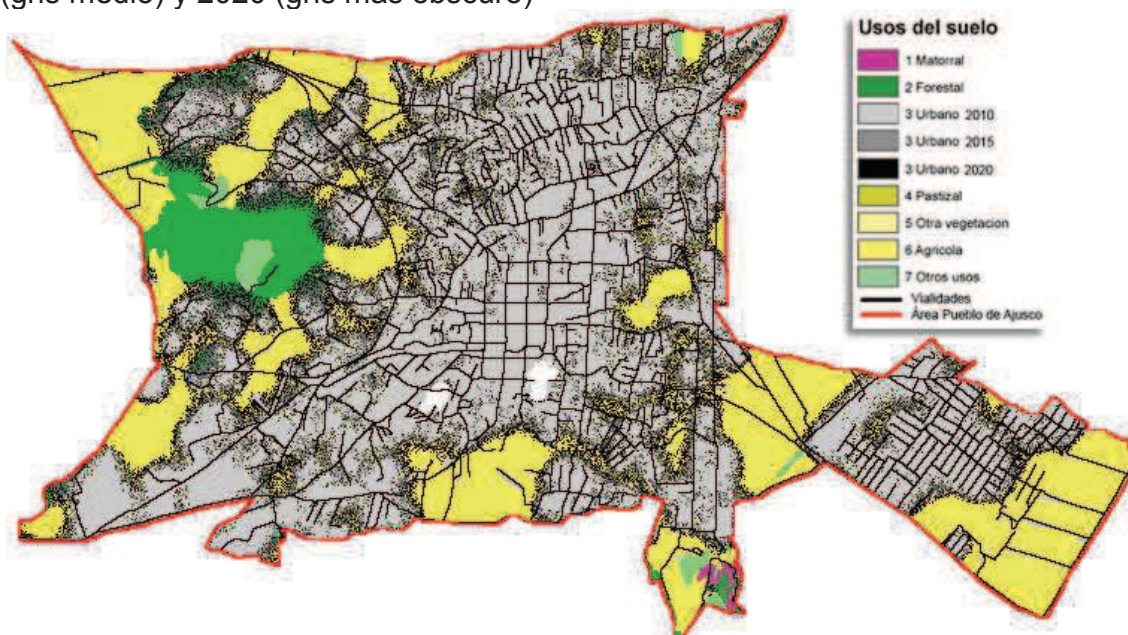


Imagen 4.6.2.a. Simulación de los cambios de usos de suelo en San Miguel y Santo Tomás Ajusco en los años de 2010, 2015 y 2020.

Fuente: Elaboración propia.

En la imagen 4.6.2.b, se muestran los cambios de uso de suelo, en particular el crecimiento urbano, a partir de datos del 2005 (zona en rojo) y los años simulados 2010, 2015 y 2020.

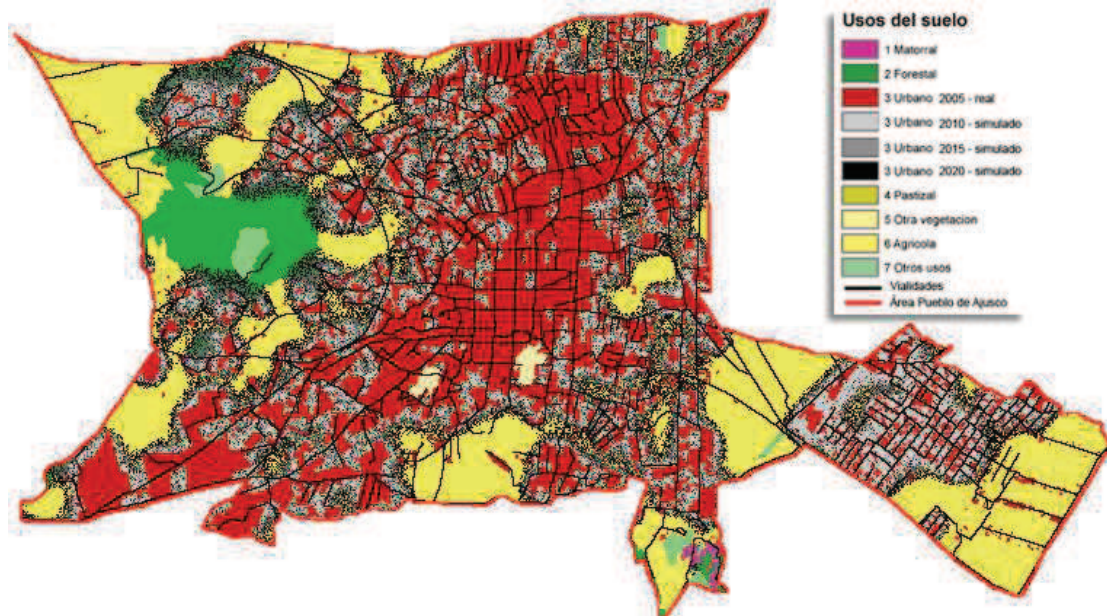


Imagen 4.6.2.b. Simulación de los cambios de usos de suelo en San Miguel y Santo Tomás Ajusco en los años de 2010, 2015 y 2020 y el área urbana en el 2005.
Fuente: Elaboración propia.

4.6.3. Validación del modelo y la simulación

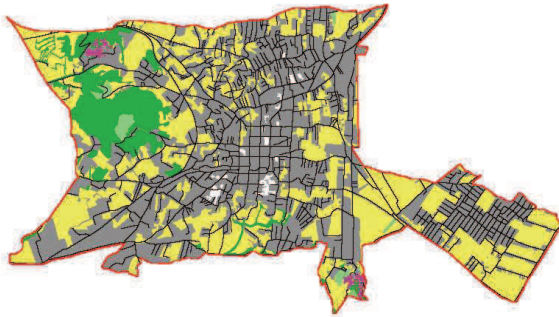
¿Cómo poder validar el modelo?, ¿Qué tan buena es la simulación? Para responder a estas preguntas hay que comparar los resultados de la simulación con los datos reales. White (1997) menciona que varios enfoques son posibles: (1) una comparación visual de los mapas, (2) una evaluación cuantitativa del grado en que las zonas de uso de los suelos en los dos mapas coinciden, y (3) la comparación de medidas más abstractas de los dos mapas, como las distintas medidas de la dimensión fractal.

Se decidió que para medir la similitud entre los datos reales del 2010, tanto a nivel espacial como tendencial, se usarán los siguientes 3 enfoques:

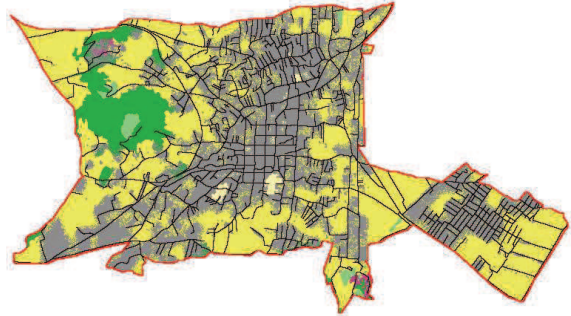
1. Comparación visual – cualitativa
2. Tendencial – cuantitativo
3. Comparación cuantitativa que mida el grado de similitud de las zonas de usos de suelo. Se usará el método RMSE.

4.6.3.1. Visual

En la imagen 4.6.3.1.a. se muestran los usos de suelo reales, estas zonas fueron creadas a partir de una imagen aérea del año 2010 y también se muestran los usos de suelo simulados a partir de los datos reales del año 2005.



Usos de suelo en San Miguel y Santo Tomás Ajusco en 2010. **Observada o real.**



Usos de suelo en San Miguel y Santo Tomás Ajusco en 2010. **Simulada o predicción.**

Imagen 4.6.3.1.a. Comparación visual del año 2010 real y simulada
Fuente: Elaboración propia.

En la imagen 4.6.3.1.b. se superpusieron las imágenes correspondientes al año 2010 con datos reales, el gris más fuerte denota la zona urbana real y en gris más claro denota la zona urbana simulada.

Como se puede observar hay discrepancias a simple vista, sin embargo existe un algo grado de similitud a nivel espacial, es decir se dieron los cambios de uso de suelo de agrícola a urbano muy cercanos a la realidad.

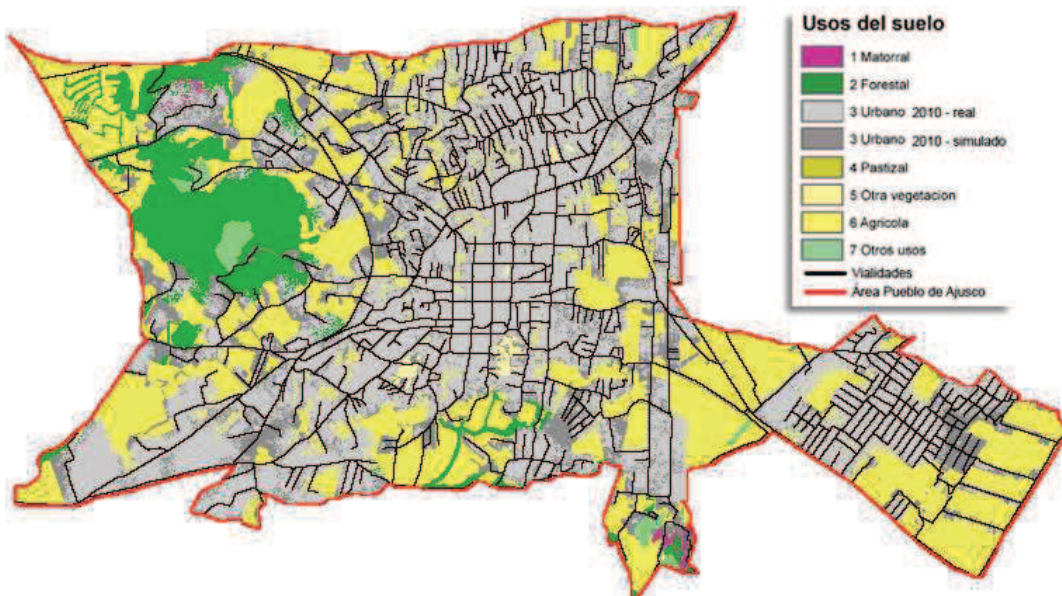


Imagen 4.6.3.1.b. Sobreposición del área urbana simulada sobre la real para el año 2010.
Fuente: Elaboración propia.

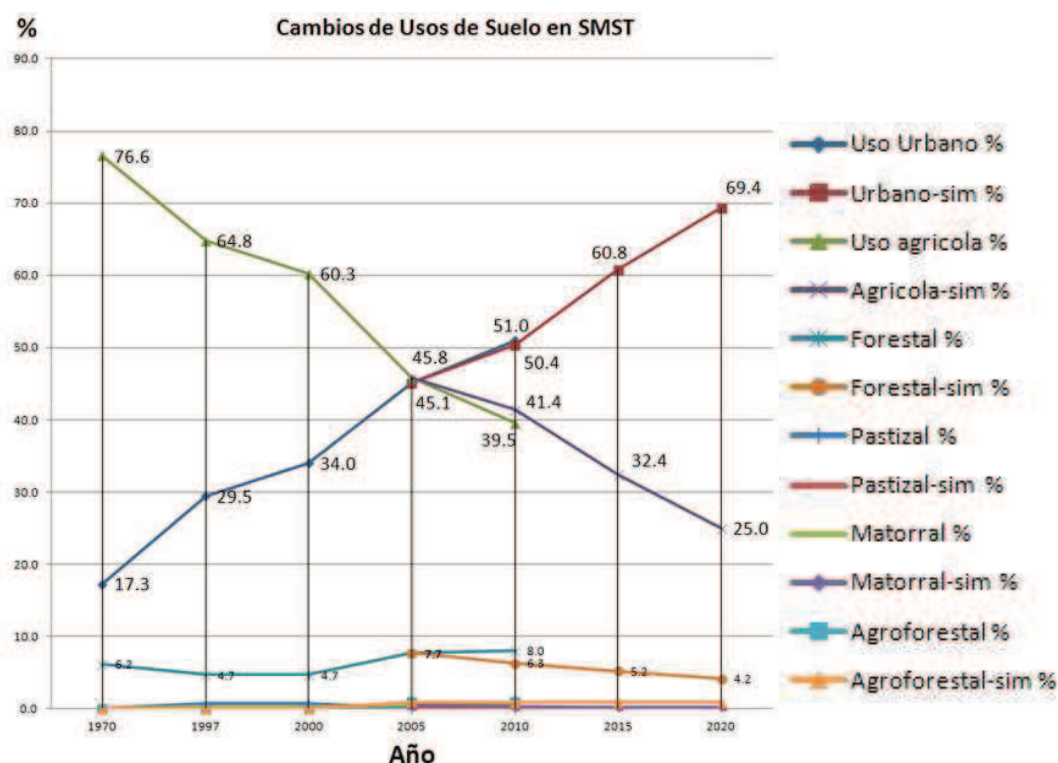
4.6.3.2. Tendencial

En la sección anterior se dio una primera aproximación para medir la similitud entre los datos reales y los simulados de manera espacial, ahora se usará un enfoque cuantitativo, en donde se muestra una gráfica de las tendencias de los cambios de uso de suelo. En la tabla 4.6.3.2.a se muestran los datos tendenciales de los cambios de uso de suelo de los años de 1970, 1997, 2000, 2005 y 2010 con datos reales. También se muestra las tendencias de los cambio de uso de suelo para los años 2010, 2015 y 2020 simulados.

Año	Uso Urbano %	Urbano Simulado %	Uso agrícola %	Agrícola simulado %	Forestal %	Forestal simulado %	Pastizal %	Pastizal simulado %	Matorral %	Matorral simulado %	Agroforestal %	Agroforestal simulado %
1970	17.3		76.6		6.2		0.0		0.0		-	-
1997	29.5		64.8		4.7		0.7		0.3		-	-
2000	34.0		60.3		4.7		0.7		0.3		-	-
2005	45.1	45.1	45.8	45.8	7.7	7.7	0.0	0.0	0.5	0.5	0.9	0.9
2010	51.0	50.4	39.5	41.4	8.0	6.3	0.0	0.0	0.5	0.3	0.9	0.9
2015		60.8		32.4		5.2		0.0		0.2		0.9
2020		69.4		25.0		4.2		0.0		0.2		0.9

Tabla. 4.6.3.2.a. Tendencias de cambios de uso de suelo para los años 1970, 1997, 2000, 2005 y 2010 reales. 2010, 2015 y 2020 simulados. Elaboración propia.

En la gráfica 4.6.3.2.a. se puede apreciar las tendencias entre los datos reales y simulados y en donde hay una gran similitud.



Gráfica 4.6.3.2.a. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 1970, 1997, 2000, 2005 y 2010 reales y 2010, 2015 y 2020 simulados. Elaboración propia.

4.6.3.3. Comparación de imágenes: uso del método RMSE

El tercer enfoque para validar el modelo y la simulación es comparar imágenes reales y simuladas con el uso del método RMSE (Root Mean Squared Error). En la imagen 4.6.3.3.a se puede observar la corrida del método RMSE y los resultados obtenidos. Ver Anexo A.7 para una descripción del método RMSE.

```
C:\Users\... \Comparar Imagenes\2>dir
El volumen de la unidad C es OS
El número de serie del volumen es: B4B7-99A8

Directorio de C:\Users\... \Comparar Imagenes\2

26/12/2011  07:14 p.m.    <DIR>          .
26/12/2011  07:14 p.m.    <DIR>          ..
26/12/2011  07:12 p.m.                47,156  2010-r-corte.png
26/12/2011  07:13 p.m.                58,986  2010-s-corte.png
26/12/2011  07:14 p.m.                35,120  2010-simil.png
                3 archivos          141,262 bytes
                2 dirs          303,595,491,328 bytes libres

C:\Users\... \Comparar Imagenes\2>compare -verbose -
metric RMSE -subimage-search 2010-r-corte.png 2010-s-corte.png 2010-similar1.png
2010-r-corte.png PNG 877x627 877x627+0+0 8-bit DirectClass 47.2KB 0.016u 0:00.02
3
2010-s-corte.png PNG 877x627 877x627+0+0 8-bit DirectClass 59KB 0.016u 0:00.018
Image: 2010-r-corte.png
Channel distortion: RMSE
red: 7446.98 (0.113634)
green: 8042.2 (0.122716)
blue: 6355.09 (0.0969724)
alpha: 0 (0)
all: 6334.86 (0.0966637)
2010-r-corte.png=>2010-similar1.png PNG 877x627 877x627+0+0 8-bit PseudoClass 15
c 32.8KB 0.530u 0:00.181

C:\Users\... \Comparar Imagenes\2>
```

Imagen 4.6.3.3.a. Corrida del algoritmo RMSE sobre las imágenes del 2010: real y simulada.

Al correr el método RMSE en las imágenes del año de 2010 real y la imagen del año de 2010 simulada, dio como resultado que se tiene un **error del 0.0966637** (normalizado) y en porcentaje se tiene un **9.7 %** de error entre las dos imágenes, es decir, se tiene un **90.3 % de similitud** entre las imágenes. Imagen 4.6.3.3.b.



Imagen 4.6.3.3.b. Imagen resultante al correr el algoritmo RMSE, las zonas en rojo indican diferencias y las zonas en negro indican similitudes entre las imágenes.

4.6.4. Comprobación de las hipótesis

4.6.4.1. Hipótesis general

- Los cambios de usos del suelo pueden ser modelados, simulados y generar predicciones, si se parte de las decisiones individuales de los agentes y su entorno, observando el comportamiento colectivo de los mismos.

Se creó un modelo de los cambios de los usos del suelo en el área de estudio, desde la perspectiva de los autómatas celulares, es decir, a partir de la definición de células (usos de suelo) y su interacción con su vecindario (función de transición) generándose un comportamiento colectivo (sistema emergente) que es el cambio de los usos del suelo.

Se comprobó que la simulación generada por el modelo basado en AC tiene con alto grado de certeza de los cambios de uso de suelo a lo largo del tiempo, teniendo escenarios a corto y mediano plazo (predicciones). Los cambios de uso de suelo pueden ser considerados un sistema urbano complejo, ya que en él influyen una gran cantidad de agentes que intervienen en su dinámica tanto espacial como temporalmente.

4.6.4.2. Hipótesis Particulares

- Es posible modelar y simular los cambios de usos del suelo y el crecimiento urbano en el pueblo de Ajusco, a través de la teoría de los autómatas celulares, considerando los aspectos: (1) las conveniencias entre los usos de suelo, (2) el efecto que tiene sobre un uso de suelo específico la existencia de distintos usos de suelo aledaños, (3) el factor de la accesibilidad local, y (4) el nivel del conocimiento del mercado inmobiliario.

El resultado de la simulación de los cambios de usos del suelo en la zona de estudio alcanzaron un 90.5% de semejanzas entre la imagen predicha y la imagen real. Tomando en cuenta los cuatro aspectos propuestos en la hipótesis de este trabajo.

- Los sistemas emergentes que surgen de los sistemas complejos se pueden explicar si se entienden las decisiones individuales de los agentes.

El sistema emergente que se generó fue los cambios de usos del suelo, siendo generado únicamente por el estado inicial de las células y su entorno inmediato.

- Por lo anterior es posible generalizar el modelado y simulación de los sistemas urbanos complejos si se utiliza la teoría de Autómatas Celulares.

Lo que falta por hacer, es aplicar el modelo bajo las mismas condiciones iniciales de las variables utilizadas para simular los cambios de uso de suelo en otras áreas similares, como por ejemplo Topilejo o Parres, para comprobar que su aplicación se puede generalizar.

4.7. Conclusiones

4.7.1. Sobre la modelación y simulación en la zona de estudio

Se pudo estudiar y analizar el comportamiento de los cambios de uso de suelo, considerándolos como un sistema urbano complejo, utilizando la teoría de los autómatas celulares.

Con el uso del modelo basado en los A.C. y las simulaciones que se realizaron a través de la interfaz que se desarrolló, fue posible comprender mejor las relaciones que se tienen con las distintas variables, detectándose las siguientes:

1. Se tiene un alto grado de relación entre el cambio de uso agrícola a urbano debido a que existe una infraestructura vial que permite el acceso a estos terrenos y la no aplicación de las normas existentes que impidan su cambio.
2. Se detectaron dos zonas con patrones de crecimiento urbano:
 - a. Uno, es la zona central que del año 2005 al 2010 tuvo un incremento del 164% en su área urbana.
 - b. Dos, es la zona de la Venta, en la cual, su crecimiento es del doble que del área central ya que del año 2005 al 2010 tuvo un incremento del 338%. Ver tabla 4.7.1.a.

Uso Urbano	2005	2010 Real	2010 Simulado	Incremento entre 2005 y 2010 en %
Total	324.4 ha	540.2 ha	533.7 ha	166.5 %
Central	304.2 ha	474.6 ha	467.6 ha	156.0 %
Venta	20.2 ha	65.6 ha	66.0 ha	324.7 %

Tabla. 4.7.1.a. Incremento por has. y % urbano, total y por zonas: Central y la Venta

3. Basados en los resultados de la simulación para el año 2010 y comparados con los datos reales para dicho año, se simularon los cambios esperados de los usos de suelo para los años de 2015 y 2020, que pueden ser usados como herramienta para la planeación urbana de la zona de estudio.

4.7.2. Sobre la situación actual y la problemática de la zona de estudio

Desde la época de la conquista española el pueblo de Ajusco ha vivido una historia llena de problemas y de luchas por conservar sus tierras.

En los últimos 50 años el pueblo de Ajusco fue perdiendo una parte de su territorio debido a diversas expropiaciones realizadas con el objeto de instalar servicios públicos o bien por las ventas ilegales de las parcelas comunales o ejidales y de las pequeñas propiedades. Esta pérdida ha aumentado por la creación de vías de comunicación (avenidas, calles, etc.), ya sea de manera legal o ilegal, provocando la facilidad para el asentamiento de nuevos habitantes.

Por la dinámica que se detectó en los cambios de uso de suelo, el crecimiento urbano tiene un gran impacto en la zona agrícola, es decir, la zona donde crece principalmente lo urbano es sobre suelo agrícola.

El crecimiento urbano no se da por invasión, ésta se da por la venta de lotes de suelo ejidal principalmente. Esta venta se da principalmente por la necesidad de tener recursos los habitantes de la zona de estudio. Siendo éste el principal factor del cambio de los usos del suelo en zona. Este fenómeno ha sido tolerado por las autoridades, tanto ejidales, delegacionales y del D.F.

El cambio de uso de agrícola a urbano ha tenido un crecimiento importante en los últimos 15 años, ya que en el año de 1997 el suelo urbano tenía un 29.5% de la superficie y uso agrícola tenía un 64.8% y para el año 2010 el suelo urbano tenía un 51.0% de la superficie y el uso agrícola tenía un 39.5%, es decir lo urbano creció 20.5% y el suelo agrícola perdió 21.5%, es decir casi la misma cantidad que creció lo urbano, el suelo agrícola lo perdió.

Esto se puede explicar porque la agricultura ha disminuido debido a que ya no es redituable para sus propietarios, dedicándose a otras actividades productivas.

La zona de bosques es otro uso de suelo que ha perdido superficie en consecuencia por el crecimiento urbano de la zona, pero en menor medida.

Otro aspecto que no se utilizó como variable en el modelado, pero que es importante mencionar, es que con el alto grado de crecimiento urbano traerá varios problemas, como:

- Falta de servicios básicos: agua, luz, drenaje.
- Falta de equipamiento: Mercados, escuelas, servicios médicos.
- Falta de transporte público, y el incremento del transporte privado.
- Problemas y carecías de vías de comunicación adecuadas, esto es, para llegar a la zona de SMSTA solo se tiene un acceso, que es la carretera Picacho-Ajusco.

4.7.3. Sobre el modelo de White

Con respecto al modelo de White que fue el utilizado para simular los cambios de uso de suelo, se probó que genera datos (planos) que tiene un alto grado de semejanzas a la hora de compararlos con datos reales. En nuestro caso al comparar la imagen real para el año 2010 y la imagen simulada para ese mismo año, se tuvo un 90.3% de similitud entre ambas imágenes.

Esto da como conclusión que la simulación de los cambios de uso de suelo a corto plazo, 2015 (5 años) y mediano plazo, 2020 (10 años) se pueden tomar como base para hacer una planeación y calcular los servicios y equipamientos necesarios que se van a requerir en cada periodo. Además, también puede ayudar a ver qué zonas van a necesitar de nuevas vialidades, con sus correspondientes sistemas de transporte público, para disminuir la cantidad de tránsito vehicular.

También hay que considerar que con la simulación basada en AC se obtienen resultados a nivel espacial, con lo que es posible ubicar las zonas de crecimiento, con lo cual puede ayudar a las autoridades a tomar las medidas pertinentes si éste crecimiento se da en zonas de alto riesgo o en zonas de alto valor ecológico.

La modelación de fenómenos sociales y/o urbanos, específicamente los referentes a los cambios de uso de suelo, pueden ser una herramienta importante para la toma de decisiones cuando se realicen los planes de desarrollo urbano.

Es posible también definir en el modelo una de las políticas existentes sobre los cambios de usos del suelo y ver los efectos en la simulación.

En consecuencia con el punto anterior, se pueden ver reflejados directamente a nivel espacial y temporal los efectos de las políticas.

Con el ambiente computacional desarrollado es posible generar gráficas del comportamiento de los cambios de los usos del suelo, lo que da otra herramienta para el análisis de este fenómeno.

Por último se usaron tres técnicas para medir la calidad y semejanza de los resultados tanto a nivel estadístico como espacial.

5. Conclusiones generales y recomendaciones

Conclusión 1:

Los modelos basados en AC se proponen como una alternativa para la investigación y el análisis de fenómenos complejos, ya sean sociales o naturales, con un alto grado de confiabilidad.

Recomendación 1:

Por ser una alternativa relativamente nueva no solo en las ciencias sociales, sino en otras áreas, es necesario que se difunda y se enseñe esta técnica, para que se hagan más estudios en diversas áreas, tanto en sistemas sociales como naturales, considerando los resultados alentadores que se obtuvieron en este trabajo.

Conclusión 2:

El modelado y simulación basados en AC se puede establecer como un marco de experimentación para probar distintos escenarios de sistemas urbanos, en el cual se pueden ver los efectos que se tendrán si se cambia una o más variables del sistema.

Basados en los resultados obtenidos y apoyados con las técnicas de medición de la confiabilidad que se utilizaron en el presente trabajo, es posible utilizar los modelos y simulaciones de los AC como herramientas que apoyen la toma de decisiones.

Recomendación 2:

Los AC nos dan la capacidad de trabajar con sistemas complejos, que a partir de reglas simples generan patrones grupales nuevos (sistemas emergentes).

La relativa sencillez del desarrollo de modelos de sistemas urbanos en particular y potencialmente de cualquier sistema complejo utilizando la teoría de los autómatas celulares, la hacen una herramienta muy útil para entender y analizar dichos sistemas.

El urbanismo es una disciplina práctica, por lo que es indispensable contar con herramientas que ayuden para la toma de decisiones, y así tener una planeación más eficiente y eficaz.

Por lo que se propone utilizar a los AC como herramienta para la creación de escenarios a corto, mediano y largo plazo.

Conclusión 3:

Los sistemas complejos han sido hasta ahora prácticamente inabordables para un gran número de fenómenos sociales con las técnicas tradicionales de modelado, por lo que es necesario utilizar otros medios.

Recomendación 3:

Podemos utilizar a los AC para modelar y hacer simulaciones de sistemas complejos, ya sean naturales o sociales o una combinación de éstos.

Conclusión 4:

Los proyectos complejos en el urbanismo requieren estudios previos para su construcción; por lo que es importante conocer antes cuáles serán los impactos y efectos que tendrán la implementación de esos proyectos.

Recomendación 4:

Los estudios previos se pueden realizar a través de la simulación de los modelos, con los cuales se puede obtener conclusiones aplicables al sistema real.

Conclusión 5:

El uso de autómatas celulares para el modelado y simulación de fenómenos complejos tiene varios usos, entre los que podemos destacar:

- Como herramienta para la presentación y visualización de los resultados.
- Como complemento para entender fenómenos que no pueden ser resueltos completamente de una manera analítica.
- Como alternativa para el estudio de fenómenos que no pueden ser descritos matemáticamente. En tales circunstancias, el empleo de modelos basados en AC puede ser la única forma disponible para explorar estos procesos de forma sistemática.

Mediante el empleo de la teoría de los AC se pueden hacer aportaciones muy útiles para comprender fenómenos complejos que mediante otras técnicas o metodologías habría sido casi imposible su formulación, análisis y representación.

Recomendación 5:

Es importante dar a conocer este tipo de herramientas que pueden ser útiles en varios campos, no solo en el urbanismo, para afrontar los nuevos retos y poder explicar mejor los fenómenos que afecten al hombre y la naturaleza.

El trabajo de esta tesis ha tenido varios resultados:

- 1.- Comprobar la utilidad de los AC para modelar y simular sistemas complejos, específicamente se pudo modelar y simular los cambios de usos de suelo en la zona de San Miguel y Santo Tomás Ajusco con un alto índice de certeza.
- 2.- Creación de una interfaz fácil de usar, en donde se pueden realizar experimentos, al cambiar las condiciones iniciales y ver los efectos que se tendrán a corto y mediano plazo.
- 3.- Poder crear escenarios de los cambios de uso de suelo a corto y mediano plazo con alto grado de certeza que puedan ser usados como herramientas para la creación de un plan parcial de desarrollo urbano del Pueblo de Ajusco.**
- 4.- Comprender mejor la teoría de los autómatas celulares, la cual puede ser utilizada para un gran número de sistemas complejos, tanto sociales como naturales.

Toda teoría de los usos del suelo, así como sus modelos y sus simulaciones, han sido una guía para las políticas sobre los usos del suelo y su cambio.

Sin embargo hay que ser rigurosos de qué teoría escoger ya que inapropiadas e inadecuadas teorías, modelos y simulaciones del cambio de uso del suelo pueden desviar la política y producir más males que los bienes que pretende hacer.

Por lo que no se puede aplicar una sola teoría o modelo. Se deben complementar.

Bibliografía

- Aguilera Ontiveros, Antonio, 2002, "Ciudades como tableros de ajedrez. Introducción al modelado de dinámicas urbanas con autómatas celulares", El Colegio de San Luis, México, San Luis Potosí.
- Axtell, Robert, 2000, "Why Agents? On the varied motivations for agent computing in the social sciences", The Brookings Institution, Washington, D.C.
- Briassoulis, Helen, 2000, "Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modeling Approaches", Department of Geography University of the Aegean Lesvos, Greece.
- Camagni, Roberto, 2005, "Economía urbana", Antonio Bosch, editor, S.A., Barcelona, España.
- Camarena, Antonio, 2007, "Las relaciones sistémicas: sistema educativo/sistema cultural. Relación sistema/entorno: acoplamiento estructural. Una propuesta de análisis teórico, sobre la categoría sistémica de complejidad", Revista Vasconcelos de Educación, enero-junio 2007, vol III, núm. 4, pp. 64-80, ITSON.
- Echenique, Marcial, 1975, "Modelos matemáticos de la estructura espacial urbana: aplicaciones en América Latina", Primera edición: junio de 1975, Buenos Aires, Argentina.
- Gilbert y Conte, 1994, "Artificial Societies. The Computer Simulation of Social Life", UCL Press 1994.
- Izquierdo, Galán, Santos y Del Olmo, 2008, "Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas". EMPIRIA- Revista de Metodología de Ciencias Sociales, No 16. Junio-diciembre 2008, pp, 85-112.
- Johnson, Steven, 2003, "Sistemas emergentes o qué tienen en común hormigas, neuronas, ciudades y software", FCE, México, D.F.
- Luhmann, Niklas, 2002, "Introducción a la teoría de Sistemas", Universidad Iberoamericana, Traducción de Javier Torres Nafarrate, Primera reimpresión 2002, México, D.F.
- Ortega, Emmauel, 2012, "Tecnologías avanzadas en Bioinstrumentación Análisis Fractal", Cinvestav, México, D.F.

- Percheron, Nicole. 1983. "Problemas agrarios del Ajusco. Siete comunidades agrarias de la periferia de México (Siglos XVI-XX)". Primera edición en español, 2008. GDF.
- Ramírez, Santiago (coordinador), 1999, "Perspectivas en la teoría de sistemas", Editorial Siglo XXI, UNAM, México, D.F.
- Reynoso, Carlos, 2006, "Complejidad y caos: una aproximación antropológica", Bueno Aires, Argentina.
- Schelling, Thomas, 1989, "Micromotivos y Macroconductas", Fondo de Cultura Económica, Primera edición en español 1989, México, D.F.
- Schteingart, Martha y Salazar, Clara, 2005, "Expansión Urbana, Sociedad y Ambiente. El caso de la Ciudad de México", El Colegio de México, México, D.F.
- Shannon, R.E. 1998, "INTRODUCTION TO THE ART AND SCIENCE OF SIMULATION", Winter Simulation Conference, Texas A&M University, USA.
- Serrano Candela, Fidel, 2006, "Simulación de un sistema urbano usando autómatas celulares", Facultad de Ciencias, UNAM, Tesis.
- Simmel, Georg, 2002, "Cuestiones fundamentales de la sociología"
- Torrens, Paul, 2000, "How cellular models of urban systems work, (1. Theory)", UCL Press, London.
- Von Bertalanffy, Ross, Weinberg, 1987, "Tendencias en la teoría general de sistemas", Versión en español de George J. Klir, Alianza Editorial, Tercera reimpresión 1987, Madrid, España.
- White, R., 1996, "The use of constrained cellular automata of high-resolution modelling of urban land-use dynamics", *Environment and Planning B: Planning and Design* 24(3) 323 – 343, Memorial University of Newfoundland, St. John's, Canada.
- Wolfram, Stephen, 2002. "A New Kind of Science", consultado en línea: <http://www.wolframscience.com/nksonline/toc.html>
- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.
- Ley General de Asentamientos Humanos
- Ley de Planeación

- Plan Nacional de Desarrollo (2007-2012)
- Ley de Desarrollo Urbano del D.F. (15 de Julio 2010)
- Programa General de Desarrollo Urbano del D.F.
- Programa Delegacional de Desarrollo Urbano 2010 de Tlalpan
- Gaceta oficial del Distrito Federal, 23 de Septiembre del 2005
- http://es.wikipedia.org/wiki/Aut%C3%B3mata_celular
- http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_complejo
- http://en.wikipedia.org/wiki/Root_mean_square_deviation
- NetLogo:
 - <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>
 - <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/docs/>
 - <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/docs/gis.html#gis:load-dataset>
 - <http://gisagents.blogspot.com/2010/07/netlogo-gis-examples-from-backspacesnet.html>
- http://www.paot.org.mx/paot_docs/GEO_DATO/principal_002.html
- <http://www.imagemagick.org/script/index.php>
- <http://mathworld.wolfram.com/MooreNeighborhood.html>
- <http://worldinbalance.net/intagreements/1987-brundtland.php>
- <http://mathworld.wolfram.com/CellularAutomaton.html>
- <http://mathworld.wolfram.com/MooreNeighborhood.html>
- <http://mathworld.wolfram.com/vonNeumannNeighborhood.html>
- <http://mathworld.wolfram.com/CellularAutomaton.html>
- <http://www.wolframscience.com/nksonline/toc.html>

Anexos

A.1 NetLogo

Creado por: Uri Wilensky
Desarrollado en: Northwestern University Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling
Versión usada: 4.1.3
Sistema Operativo: Multiplataforma (JVM)
Licencia: LGPL
Website: ccl.northwestern.edu/netlogo

NetLogo es un entorno de modelado integrado y lenguaje de programación de multi-agentes (autómatas celulares) y que permite la simulación de fenómenos naturales y sociales.

NetLogo permite la exploración de los fenómenos emergentes. Es particularmente útil para modelar sistemas complejos que evolucionan en el tiempo. Los desarrolladores de modelos pueden dar instrucciones a cientos o miles de agentes para que todos ellos operen de manera independiente, entre sí y con el entorno. Esto hace posible explorar la relación entre el comportamiento a bajo nivel de los individuos y los patrones macroscópicos que surgen a partir de la interacción de muchos individuos entre sí.

Permite a los usuarios abrir simulaciones y “jugar” con ellas, así como explorar su comportamiento bajo una serie de condiciones. Asimismo, permite al usuario la creación de sus propios modelos. Además, su grado de desarrollo actual es suficiente como para servir como una herramienta potente para investigadores en muchos ámbitos.

El programa incluye una librería de modelos, que pueden ser ejecutadas y modificadas. Este conjunto de modelos pertenecen a ámbitos muy diversos, tanto de las ciencias naturales (biología, medicina, física y química) como de las ciencias sociales (psicología social, etc) y otras como matemáticas, computación, y economía.

Con NetLogo se puede implementar un autómata celular (AC), tomando en cuenta:

- El espacio celular lo podemos representar a través de los “patches”
- Los estados los podemos representar a través de las “turtles”
- Función de transición: links (relación entre turtles – estados–)
- Por último, a través del visor, podemos observar la evolución de los AC.

A.1.1 Características

Sistema:

- Multiplataforma: Se ejecuta sobre Windows, Linux, Unix, Mac y cualquier S.O. que soporte una JVM.

Lenguaje:

- Entorno de programación integrado
- Lenguaje de programación estructurado simple, inspirado en Logo
- Con soporte para una programación fácil de agentes
- Existen dos tipos principales de agentes: móviles (turtles) y fijos (patches)
- Crea enlaces entre los agentes móviles y fijos de una manera fácil.
- Soporta una gran variedad de tipos de datos: enteros, doble (float) carácter, cadenas, etc.

Ambiente:

- Visualización del modelo en 2D y 3D
- Soporta archivos con formato vectorial (shp) e imágenes (raster)
- Creación fácil de menús, botones, monitores, cajas de texto, etc.
- Sistema de ploteo potente y flexible
- Se puede monitorear a nivel de agentes individuales
- Guardar estados del modelo

Soporte para ambiente Web:

- El modelo puede ser guardado como applet para ser incrustado en páginas web.

El ambiente de programación de NetLogo tiene 3 secciones principales: Interfaz, Información y Procedimientos. Ver imagen A.1.1.

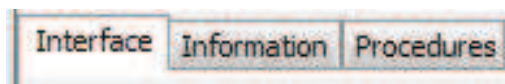


Imagen A.1.1. Tres secciones de NetLogo.

En la sección de interfaz “Interface” es donde se implementa la interfaz de usuario del algoritmo que se va a implementar. Ver imagen A.1.2.

Modelado y simulación de sistemas urbanos complejos basado en autómatas celulares.
Caso de estudio: Los cambios de usos del suelo y crecimiento urbano en el pueblo de Ajusco

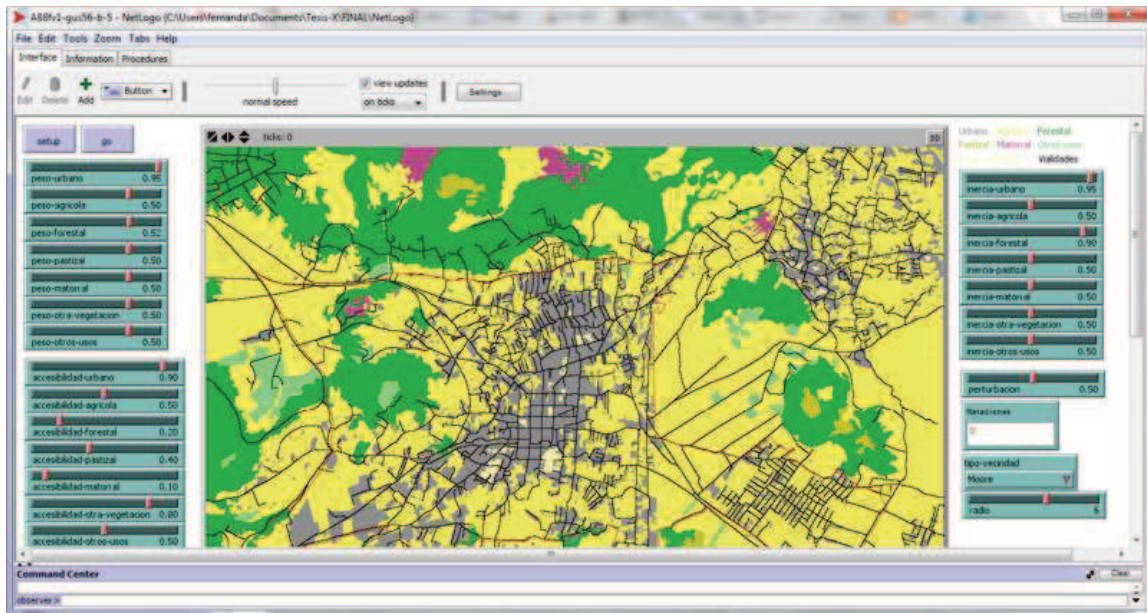


Imagen A.1.2. Ejemplo de la sección de "Interface" en NetLogo.

En la sección de información "Information" es donde se pone la documentación del algoritmo que se está implementado. Esta sección es opcional para la implementación del modelo, aunque es conveniente para los futuros usuarios. Ver imagen A.1.3.

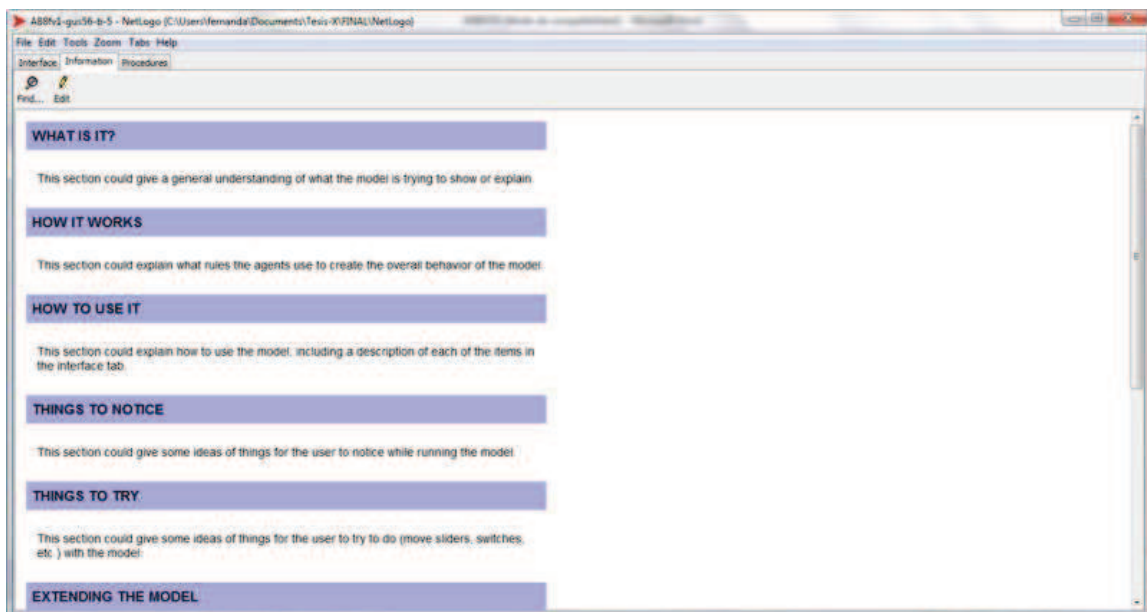


Imagen A.1.3. Ejemplo de la sección de "Information" en NetLogo.

En la sección de procedimientos "Procedures" es donde se va a codificar (programar) el modelo o algoritmo. Ver imagen A.1.4.

Modelado y simulación de sistemas urbanos complejos basado en autómatas celulares.
Caso de estudio: Los cambios de usos del suelo y crecimiento urbano en el pueblo de Ajusco



```
to setup
  clear-all
  ask patches [set color white] ;; pone las celdas de color blanco
  set contorno-dataset gis:load-dataset 'shp/ContornoSRSTV_FeatureToPoly.shp' ;;carga el contorno del pueblo de ajusco en formato shape
  set ajusco-dataset gis:load-dataset 'Raster ASC/USOSRBB.asc' ;;carga plano de usos de suelo en formato raster ascii con celdas de 8 metros
  gis:apply-raster ajusco-dataset pv-ajusco
  set vialidad-dataset gis:load-dataset 'Raster ASC/v188.asc' ;;carga plano de vialidades en formato raster-ascii con celdas de 8 metros
  gis:apply-raster vialidad-dataset pv-vialidad
  dibuja ;; llama al procedimiento dibuja
  set Nu inercia-urbano
  set Na inercia-agricola
  set Nf inercia-forestal
  set Np inercia-pastizal
  set Nm inercia-matorral
  set Nv inercia-otra-vegetacion
  set Nuw inercia-otros-usos
  set vr-radio radio
end

;; =====
;; INICIA PROCEDIMIENTO GO
;; =====
to go ;; procedimiento principal para la funcion de transicion de White
  repeat (c-totales-1)
  [
    set celda-analizada celda-analizada + 1
    ask one-of patches [
      if color = gray ;; si la celda es gris (gray) es urbano y vale 1
      [
        set uso-suelo 1
      ]
    ]
  ]
end
```

Imagen A.1.4. Ejemplo de la sección de “Procedures” en NetLogo.

A.2 Implementación de la interfaz del modelo de White en NetLogo

Se explicarán las distintas partes de la interfaz que se implementó para el modelo de White en NetLogo. En la imagen A.2.1 y A.2.2 se muestran una vista general de la interfaz.

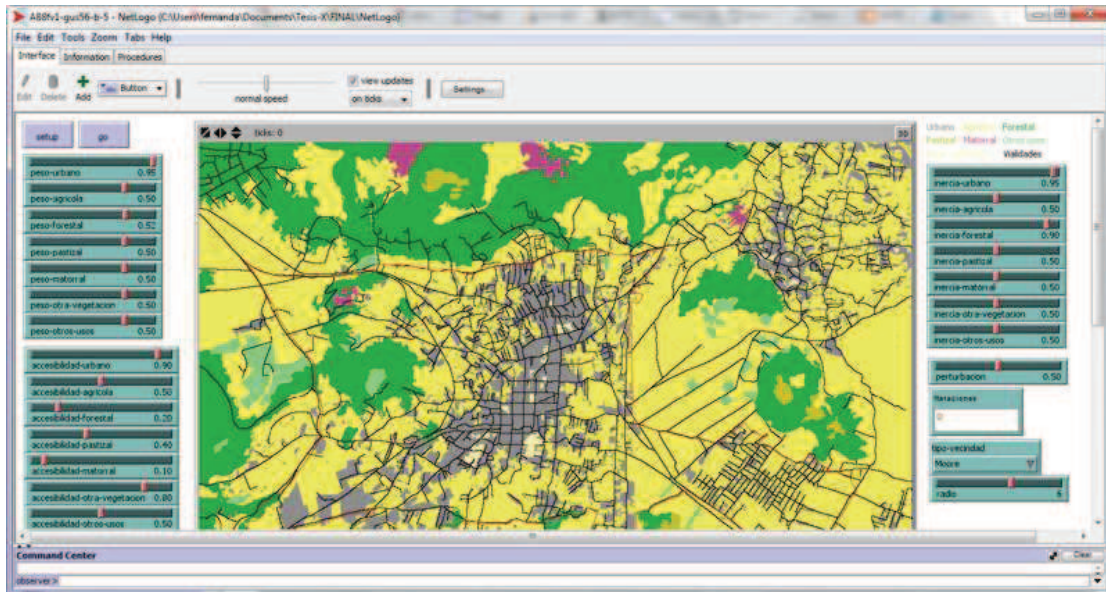


Imagen A.2.1. Vista general de la interfaz, parte superior.

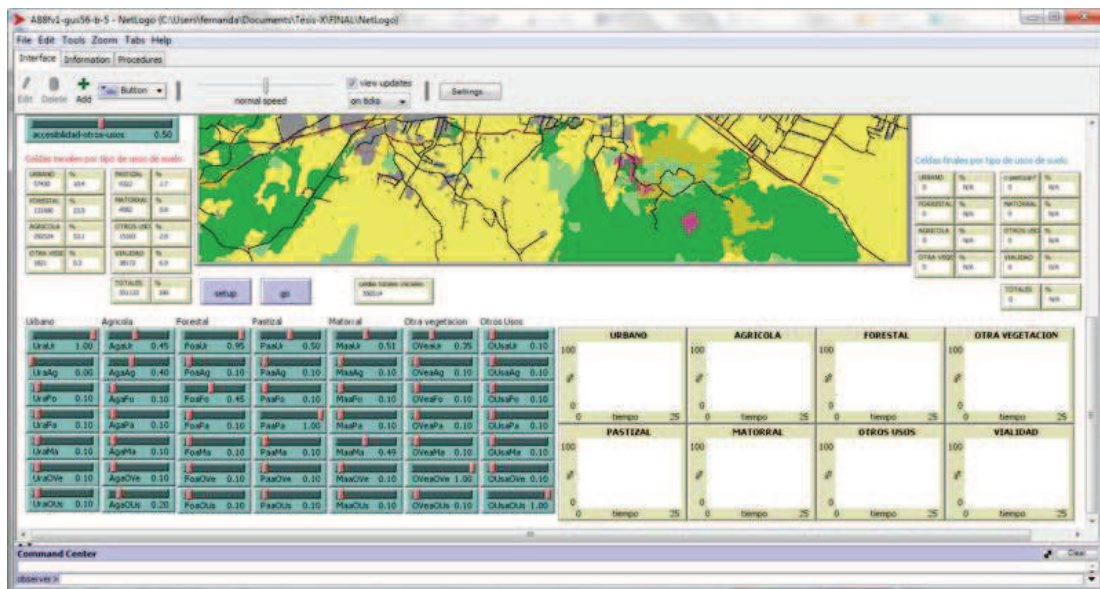


Imagen A.2.2. Vista general de la interfaz, parte inferior

Para comenzar a utilizar la interfaz y comenzar a correr la simulación se tienen dos botones, el primero “setup” se utiliza para cargar el plano en formato raster de la zona de estudio, además de inicializar las variables. Posteriormente se usa el

botón de “go” para comenzar la simulación, si se quieren usar los valores por defecto de las distintas variables usadas en el modelo de White.



Imagen A.3. Botones de “setup” y “go”

En la imagen A.2.3., se muestran los botones de tres variables, peso, inercia y accesibilidad, para cada tipo de uso de suelo, como lo define Roger White en su modelo, cada una de estas variables puede tomar un valor que va entre 0 a 1, con una precisión de centésimas.

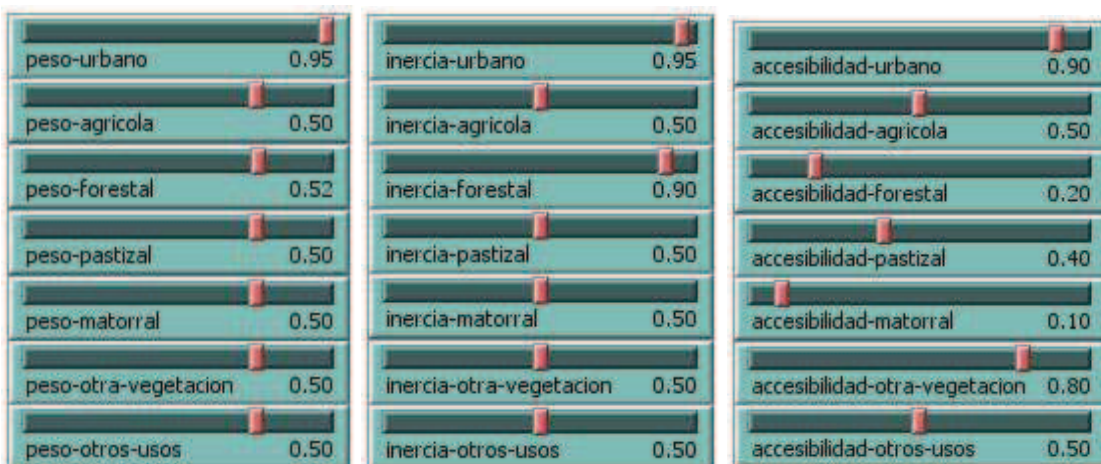


Imagen A.2.3. menú de las variables de peso, inercia y accesibilidad.

En la imagen A.2.4, se muestra el botón para la variable de perturbación, esta puede tomar valores que van de 0 a 1 con una precisión de centésimas.



Imagen A.2.4. Botones de perturbación

En la imagen A.2.5, se muestra el menú de la variable de tipo de vecindad, en este caso se implementaron dos tipos de vecindad, la de Moore y la de Von Neumann, el usuario puede escoger cualquiera de las dos opciones, además puede escoger el radio de la vecindad, este puede tomar valores que van desde 0 hasta 10.

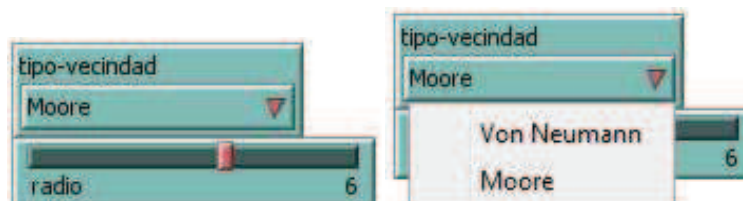


Imagen A.2.5. Menú del tipo de vecindad y el radio.

En la imagen A.2.6, se muestra la matriz de probabilidades de cambios entre usos de suelo. Cada variable puede tomar valores entre 0 y 1 con una precisión de centésimas.

Urbano	Agrícola	Forestal	Pastizal	Matorral	Otra vegetación	Otros Usos
UraUr 1.00	AgaUr 0.45	FoaUr 0.95	PaaUr 0.50	MaaUr 0.51	OVeUr 0.35	OUsUr 0.10
UraAg 0.00	AgaAg 0.40	FoaAg 0.10	PaaAg 0.10	MaaAg 0.10	OVeAg 0.10	OUsAg 0.10
UraFo 0.10	AgaFo 0.10	FoaFo 0.45	PaaFo 0.10	MaaFo 0.10	OVeFo 0.10	OUsFo 0.10
UraPa 0.10	AgaPa 0.10	FoaPa 0.10	PaaPa 1.00	MaaPa 0.10	OVePa 0.10	OUsPa 0.10
UraMa 0.10	AgaMa 0.10	FoaMa 0.10	PaaMa 0.10	MaaMa 0.49	OVeMa 0.10	OUsMa 0.10
UraOVe 0.10	AgaOVe 0.10	FoaOVe 0.10	PaaOVe 0.10	MaaOVe 0.10	OVeOVe 1.00	OUsOVe 0.10
UraOUs 0.10	AgaOUs 0.20	FoaOUs 0.10	PaaOUs 0.10	MaaOUs 0.10	OVeOUs 0.10	OUsOUs 1.00

Imagen A.2.6. Matriz de probabilidades de cambios de usos de suelo,

Como parte del diseño de la interfaz se implementaron ventanas o visores en donde se gráfica el cambio (crecimiento o decrecimiento) de los usos del suelo con respecto al tiempo. Ver la imagen A.2.7.



Imagen A.2.7. Ventanas en donde se gráficos los cambios de uso de suelo.

En la imagen A.2.8, se muestra los contadores de las celdas iniciales de los usos de suelo, antes iniciar la simulación y los contadores de las celdas finales de los usos de suelo al finalizar la simulación.

Celdas iniciales por tipo de usos de suelo		Celdas iniciales por tipo de usos de suelo					
URBANO	%	PASTIZAL	%	URBANO	%	PASTIZAL	%
57430	10.4	9322	1.7	57430	10.4	9322	1.7
FORESTAL	%	MATORRAL	%	FORESTAL	%	MATORRAL	%
131500	23.9	4582	0.8	131500	23.9	4582	0.8
AGRICOLA	%	OTROS USO	%	AGRICOLA	%	OTROS USO	%
292524	53.1	15163	2.8	292524	53.1	15163	2.8
OTRA VEGE	%	VIALIDAD	%	OTRA VEGE	%	VIALIDAD	%
1821	0.3	38172	6.9	1821	0.3	38172	6.9
TOTALES		%		TOTALES		%	
551133		100		551133		100	

Imagen A.2.8. Contadores de celdas iniciales y finales de los usos de suelo.

Finalmente como parte del diseño de la interfaz se implementó una ventana en donde se lleva un contador del número de iteraciones que se ha realizado en cada corrida del modelo. Ver la imagen A.2.9.



Imagen A.2.9. Ventanas del contador de iteraciones en cada corrida.

A.3 Listado del programa del modelo de White en NetLogo

El programa hace uso de un archivo en formato “shp” que es el contorno del pueblo de Ajusco: “ContornoSMSTv1_FeatureToPoly.shp” y de dos archivos en formato “raster”, el primero carga el plano donde se representan los usos del suelo con celdas de 8 por 8 metros, el archivo es: “US05m88.asc” y el otro archivo es el que representa las vialidades, con celdas de 8 por 8 metros: “v188.asc”.

A continuación se enlista el programa que se desarrolló en el ambiente de NetLogo:

```
;; inicio de sección donde se definen que extensiones son usadas en el modelo;
extensions [gis] ;;se cargan las extensiones GIS

;; fin de sección de extensiones

;; inicio de sección donde se definen las variables globales
globals [
  ajusco-dataset      ;;
  contorno-dataset   ;;
  vialidad-dataset   ;;
  center-x           ;;
  center-y           ;;
  patch-variable     ;;

  uso-suelo urbano agricola forestal pastizal matorral otra-vegetacion otros-usos vialidad ;; usos de suelo

  UU UA UF UP UM UOV UOU AU AA AF AP AM AOV AOU FU FA FF FP FM FOV FOU PUr PA PF PP PM POV POU MU
  MA MF MP MM MOV MOU OVU OVA OVF OVP OVM OVOV OVOU OUU OUA OUF OUP OUM OUOV OUOU ;; Matriz

  Phj Ppu Pua Puf Pup Pum Puov Puou Pau Paa Paf Pap Pam Paov Paou Pfu Pfa Pff Pfp Pfm Pfov Pfou Ppu Ppa Ppf Ppp
  Ppm Ppov Ppou ;; Potencial de transicion del estado h al estado j
  Pmu Pma Pmf Pmp Pmm Pmov Pmou Povu Pova Povf Povp Povm Povov Povou Pouu Poua Pouf Poup Poum Pouov
  Pouou ;; Potencial de transicion del estado h al estado j
  v
  aj
  dj dju dja djf djp djm djov djou ;;
  s
  m
  l
  Hj Hu Ha Hf Hp Hm Hov Hou ;; Parámetro de inercia para los diferentes usos de suelo

  potencial          ;;
  potencial-nuevo    ;;
  potencial-inicial  ;;
  potencial-nuevo-color ;;
  potencial-inicial-color ;;

  c-urbana-i          ;; Número inicial celdas con uso de suelo urbano
  c-agricola-i        ;; Número inicial celdas con uso de suelo agrícola
  c-forestal-i        ;; Número inicial celdas con uso de suelo forestal
  c-pastizal-i        ;; Número inicial celdas con uso de suelo pastizal
  c-matorral-i        ;; Número inicial celdas con uso de suelo matorral
  c-otros-usos-i      ;; Número inicial celdas con otros usos de suelo
  c-otra-vegetacion-i ;; Número inicial celdas con otra vegetación
  c-vialidad-i        ;; Número inicial celdas con "uso de suelo" vialidad
  c-totales-i         ;; Número total inicial de celdas

  c-urbana-f          ;; Número final celdas con uso de suelo urbano
  c-agricola-f        ;; Número final celdas con uso de suelo agrícola
```

Modelado y simulación de sistemas urbanos complejos basado en autómatas celulares.
 Caso de estudio: Los cambios de usos del suelo y crecimiento urbano en el pueblo de Ajusco

```

c-forestal-f      ;; Número final celdas con uso de suelo forestal
c-pastizal-f     ;; Número final celdas con uso de suelo pastizal
c-matorral-f     ;; Número final celdas con uso de suelo matorral
c-otros-usos-f  ;; Número final celdas con otros usos de suelo
c-otra-vegetacion-f ;; Número final celdas con otra vegetación
c-vialidad-f     ;; Número final celdas con "uso de suelo" vialidad
c-totales-f     ;; Número total final de celdas

%-c-urbana-f     ;; % número final celdas con uso de suelo urbano
%-c-agricola-f  ;; % número final celdas con uso de suelo agrícola
%-c-forestal-f  ;; % número final celdas con uso de suelo forestal
%-c-pastizal-f  ;; % número final celdas con uso de suelo pastizal
%-c-matorral-f  ;; % número final celdas con uso de suelo matorral
%-c-otros-usos-f ;; % número final celdas con otros usos de suelo
%-c-otra-vegetacion-f ;; % número final celdas con otra vegetación
%-c-vialidad-f  ;; % número final celdas con "uso de suelo" vialidad
%-c-totales-f   ;; % número total final de celdas

vecindario      ;; Se almacena las celdas vecinas de acuerdo al tipo de vecindad (moore o von neumann) y el radio
vr1 vr2 vr3 vr4 vr5 vr6 vr7 vr8 vr9 vr10 ;; Vecindarios por radios (1 a 10)
n-vecinos-urbano ;; Se almacenan el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo urbano
n-vecinos-agricola ;; Se almacenan el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo agrícola
n-vecinos-forestal ;; Se almacenan el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo forestal
n-vecinos-pastizal ;; Se almacenan el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo pastizal
n-vecinos-matorral ;; Se almacenan el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo matorral
n-vecinos-otros-usos ;; Se almacenan el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo otros usos
n-vecinos-otra-vegetacion ;; Se almacenan el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo otra vegetación
n-vecinos-vialidad ;; Se almacenan el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo vialidad

nvur1 nvur2 nvur3 nvur4 nvur5 nvur6 nvur7 nvur8 nvur9 nvur10 ;; número de vecinos urbanos por radio (1 a 10)
nvar1 nvar2 nvar3 nvar4 nvar5 nvar6 nvar7 nvar8 nvar9 nvar10 ;; número de vecinos agrícolas por radio (1 a 10)
nvfr1 nvfr2 nvfr3 nvfr4 nvfr5 nvfr6 nvfr7 nvfr8 nvfr9 nvfr10 ;; número de vecinos forestal por radio (1 a 10)
nvpr1 nvpr2 nvpr3 nvpr4 nvpr5 nvpr6 nvpr7 nvpr8 nvpr9 nvpr10 ;; número de vecinos pastizal por radio (1 a 10)
nvmr1 nvmr2 nvmr3 nvmr4 nvmr5 nvmr6 nvmr7 nvmr8 nvmr9 nvmr10 ;; número de vecinos matorral por radio (1 a 10)
nvour1 nvour2 nvour3 nvour4 nvour5 nvour6 nvour7 nvour8 nvour9 nvour10 ;; número de vecinos otros usos por radio (1 a 10)
nvovr1 nvovr2 nvovr3 nvovr4 nvovr5 nvovr6 nvovr7 nvovr8 nvovr9 nvovr10 ;; número de vecinos otra vegetación por radio (1 a 10)
nvvr1 nvvr2 nvvr3 nvvr4 nvvr5 nvvr6 nvvr7 nvvr8 nvvr9 nvvr10 ;; número de vecinos vialidad por radio (1 a 10)

;;por1 por2 por3 por4 por5 por6 por7 por8 por9 por10 ;; coordenadas de vecinos vialidad por radio

d1 d2 d3 d4 d5 d6 d7 d8 d9 d10 ;; distancia entre puntos

rvmc ;; radio de vialidad más cercano -- sirve para almacenar el vector más cercano en donde se encuentre una celda con vialidad
n-radio-v ;; radio de vialidad más cercano -- sirve para almacenar el radio más cercano en donde se encuentre una celda con vialidad

rv ;; radio vialidad
rvv ;; vecindad radio vialidad
lista max-v

celda-analizada ver-radio

]

;; fin de sección de variables globales .....
;; inicio de sección donde se definen patches-own .....
patches-own [pv-ajusco pv-contorno pv-vialidad ]
;; fin de sección de patches-own .....
;; inicia de sección de procedimientos .....

```

Modelado y simulación de sistemas urbanos complejos basado en autómatas celulares.
Caso de estudio: Los cambios de usos del suelo y crecimiento urbano en el pueblo de Ajusco

```
.....
;;
;; INICIA PROCEDIMIENTO SETUP
;;
.....

to setup
  clear-all
  ask patches [set pcolor white] ;; pone las celdas de color blanco

  set contorno-dataset gis:load-dataset "shp/ContornoSMSTv1_FeatureToPoly.shp" ;;carga el contorno del pueblo de ajusco
  en formato shape

  set ajusco-dataset gis:load-dataset "Raster ASC/US05m88.asc" ;;carga plano de usos de suelo en formato raster ascii con
  celdas de 8 metros
  gis:apply-raster ajusco-dataset pv-ajusco

  set vialidad-dataset gis:load-dataset "Raster ASC/vl88.asc" ;;carga plano de vialidades en formato raster ascii con celdas
  de 8 metros
  gis:apply-raster vialidad-dataset pv-vialidad

  dibuja ;; llama al procedimiento dibuja

  set Hu inercia-urbano
  set Ha inercia-agricola
  set Hf inercia-forestal
  set Hp inercia-pastizal
  set Hm inercia-matorral
  set Hov inercia-otra-vegetacion
  set Hou inercia-otros-usos
  set ver-radio radio

end

.....
;;
;; FIN DE SECCIÓN DEL PROCEDIMIENTO SETUP
;;
.....

.....
;;
;; INICIA PROCEDIMIENTO GO
;;
.....

to go ;; procedimiento principal para la función de transición de White

repeat (c-totales-i) [

  set celda-analizada celda-analizada + 1

  ask one-of patches [

    if pcolor = gray ;; si la celula es gris (gray) es urbano y vale 1
    [
      set uso-suelo 1
      set n-vecinos-urbano 0 ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo urbano
      set n-vecinos-agricola 0 ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo agrícola
      set n-vecinos-forestal 0 ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo forestal
      set n-vecinos-pastizal 0 ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo pastizal
      set n-vecinos-matorral 0 ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo matorral
      set n-vecinos-otros-usos 0 ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo otros usos
      set n-vecinos-otra-vegetacion 0 ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo otra
      vegetacion
      set n-vecinos-vialidad 0 ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo vialidad

      vecindad ;; procedimiento para asignar a la variable vecindario las celdas de acuerdo al tipo de vecindario (more o von
      neumann)
```

Modelado y simulación de sistemas urbanos complejos basado en autómatas celulares. Caso de estudio: Los cambios de usos del suelo y crecimiento urbano en el pueblo de Ajusco

```
tipos-vecinos ;; procedimiento para contabilizar el número de vecinos por tipo de uso de suelo
distancia-mas-cercana-a-vialidad ;; calcula la distancia mínima de la celda de análisis a la celda vialidad

set v calcular-v
set aj calcula-aj

set Puu precision ((v * aj * UraUr * ( 1 + (n-vecinos-urbano * peso-urbano))) + Hu) 4
set Pua precision ((v * aj * UraAg * ( 1 + (n-vecinos-agricola * peso-agricola ))) + Ha) 4
set Puf precision ((v * aj * UraFo * ( 1 + (n-vecinos-forestal * peso-forestal ))) + Hf) 4
set Pup precision ((v * aj * UraPa * ( 1 + (n-vecinos-pastizal * peso-pastizal ))) + Hp) 4
set Pum precision ((v * aj * UraMa * ( 1 + (n-vecinos-matorral * peso-matorral))) + Hm) 4
set Puov precision ((v * aj * UraOVE * ( 1 + (n-vecinos-otra-vegetacion * peso-otra-vegetacion))) + Hov) 4
set Puou precision ((v * aj * UraOUs * ( 1 + (n-vecinos-otros-usos * peso-otros-usos))) + Hou) 4

set lista (list Puu Pua Puf Pup Pum Puov Puou)
set max-v max lista

ifelse max-v = Puu [set pcolor gray] [ifelse max-v = Pua [set pcolor yellow + 1] [ifelse max-v = Puf [set pcolor lime - 1]
[ifelse max-v = Pup [set pcolor yellow - 1]
[ifelse max-v = Pum [set pcolor magenta + 1] [ifelse max-v = Puov [set pcolor yellow + 3] [ifelse max-v = Puou [
set pcolor lime + 2 ] [ set pcolor gray]]]]]]]
]

if pcolor = yellow + 1 ;; si la celula es amarillo + 1 (yellow +a ) es agricola y vale 2
[
set uso-suelo 2
set n-vecinos-urbano 0 ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo urbano
set n-vecinos-agricola 0 ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo agricola
set n-vecinos-forestal 0 ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo forestal
set n-vecinos-pastizal 0 ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo pastizal
set n-vecinos-matorral 0 ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo matorral
set n-vecinos-otros-usos 0 ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo otros usos
set n-vecinos-otra-vegetacion 0 ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo otra
vegetación
set n-vecinos-vialidad 0 ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo vialidad

vecindad ;; procedimiento para asignar a la variable vecindario las celdas de acuerdo al tipo de vecindario (more o von
neumann)
tipos-vecinos ;; procedimiento para contabilizar el número de vecinos por tipo de uso de suelo
distancia-mas-cercana-a-vialidad ;; calcula la distancia mínima de la celda de análisis a la celda vialidad

set v calcular-v
set aj calcula-aj

set Puu precision ((v * aj * AgaUr * ( 1 + (n-vecinos-urbano * peso-urbano))) + Hu) 4
set Pua precision ((v * aj * AgaAg * ( 1 + (n-vecinos-agricola * peso-agricola ))) + Ha) 4
set Puf precision ((v * aj * AgaFo * ( 1 + (n-vecinos-forestal * peso-forestal ))) + Hf) 4
set Pup precision ((v * aj * AgaPa * ( 1 + (n-vecinos-pastizal * peso-pastizal ))) + Hp) 4
set Pum precision ((v * aj * AgaMa * ( 1 + (n-vecinos-matorral * peso-matorral))) + Hm) 4
set Puov precision ((v * aj * AgaOVE * ( 1 + (n-vecinos-otra-vegetacion * peso-otra-vegetacion))) + Hov) 4
set Puou precision ((v * aj * AgaOUs * ( 1 + (n-vecinos-otros-usos * peso-otros-usos))) + Hou) 4

set lista (list Puu Pua Puf Pup Pum Puov Puou)
set max-v max lista

ifelse max-v = Puu [set pcolor gray] [ifelse max-v = Pua [set pcolor yellow + 1] [ifelse max-v = Puf [set pcolor lime - 1]
[ifelse max-v = Pup [set pcolor yellow - 1]
[ifelse max-v = Pum [set pcolor magenta + 1] [ifelse max-v = Puov [set pcolor yellow + 3] [ifelse max-v = Puou [
set pcolor lime + 2 ] [ set pcolor yellow + 1]]]]]]]
]

if pcolor = lime - 1 ;; si la celula es limon - 1 (lime - 1) es forestal y vale 3
[
set uso-suelo 3
set n-vecinos-urbano 0 ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo urbano
set n-vecinos-agricola 0 ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo agricola
set n-vecinos-forestal 0 ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo forestal
set n-vecinos-pastizal 0 ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo pastizal
set n-vecinos-matorral 0 ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo matorral
```

Modelado y simulación de sistemas urbanos complejos basado en autómatas celulares.
Caso de estudio: Los cambios de usos del suelo y crecimiento urbano en el pueblo de Ajusco

```
set n-vecinos-otros-usos 0      ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo otros usos
set n-vecinos-otra-vegetacion 0 ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo otra
vegetacion
set n-vecinos-vialidad 0      ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo vialidad

vecindad ;; procedimiento para asignar a la variable vecindario las celdas de acuerdo al tipo de vecindario (more o von
neumann)
tipos-vecinos ;; procedimiento para contabilizar el número de vecinos por tipo de uso de suelo
distancia-mas-cercana-a-vialidad ;; calcula la distancia mínima de la celda de análisis a la celda vialidad

set v calcular-v
set aj calcula-aj

set Puu precision ((v * aj * FoaUr * ( 1 + (n-vecinos-urbano * peso-urbano))) + Hu) 4
set Pua precision ((v * aj * FoaAg * ( 1 + (n-vecinos-agricola * peso-agricola ))) + Ha) 4
set Puf precision ((v * aj * FoaFo * ( 1 + (n-vecinos-forestal * peso-forestal ))) + Hf) 4
set Pup precision ((v * aj * FoaPa * ( 1 + (n-vecinos-pastizal * peso-pastizal ))) + Hp) 4
set Pum precision ((v * aj * FoaMa * ( 1 + (n-vecinos-matorral * peso-matorral ))) + Hm) 4
set Puov precision ((v * aj * FoaOve * ( 1 + (n-vecinos-otra-vegetacion * peso-otra-vegetacion))) + Hov) 4
set Puou precision ((v * aj * FoaOUs * ( 1 + (n-vecinos-otros-usos * peso-otros-usos))) + Hou) 4

set lista (list Puu Pua Puf Pup Pum Puov Puou)
set max-v max lista

ifelse max-v = Puu [set pcolor gray] [ifelse max-v = Pua [set pcolor yellow + 1] [ifelse max-v = Puf [set pcolor lime - 1]
[ifelse max-v = Pup [set pcolor yellow - 1]
[ifelse max-v = Pum [set pcolor magenta + 1] [ifelse max-v = Puov [set pcolor yellow + 3] [ifelse max-v = Puou [
set pcolor lime + 2 ] [ set pcolor lime - 1]]]]]]]
]

if pcolor = yellow - 1      ;; si la celula es amarillo - 1 (yellow - 1) es pastizal y vale 4
[
set uso-suelo 4
set n-vecinos-urbano 0      ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo urbano
set n-vecinos-agricola 0    ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo agrícola
set n-vecinos-forestal 0   ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo forestal
set n-vecinos-pastizal 0   ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo pastizal
set n-vecinos-matorral 0   ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo matorral
set n-vecinos-otros-usos 0 ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo otros usos
set n-vecinos-otra-vegetacion 0 ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo otra
vegetación
set n-vecinos-vialidad 0   ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo vialidad

vecindad ;; procedimiento para asignar a la variable vecindario las celdas de acuerdo al tipo de vecindario (more o von
neumann)
tipos-vecinos ;; procedimiento para contabilizar el número de vecinos por tipo de uso de suelo
distancia-mas-cercana-a-vialidad ;; calcula la distancia mínima de la celda de análisis a la celda vialidad

set v calcular-v
set aj calcula-aj

set Puu precision ((v * aj * PaaUr * ( 1 + (n-vecinos-urbano * peso-urbano))) + Hu) 4
set Pua precision ((v * aj * PaaAg * ( 1 + (n-vecinos-agricola * peso-agricola ))) + Ha) 4
set Puf precision ((v * aj * PaaFo * ( 1 + (n-vecinos-forestal * peso-forestal ))) + Hf) 4
set Pup precision ((v * aj * PaaPa * ( 1 + (n-vecinos-pastizal * peso-pastizal ))) + Hp) 4
set Pum precision ((v * aj * PaaMa * ( 1 + (n-vecinos-matorral * peso-matorral))) + Hm) 4
set Puov precision ((v * aj * PaaOve * ( 1 + (n-vecinos-otra-vegetacion * peso-otra-vegetacion))) + Hov) 4
set Puou precision ((v * aj * PaaOUs * ( 1 + (n-vecinos-otros-usos * peso-otros-usos))) + Hou) 4

set lista (list Puu Pua Puf Pup Pum Puov Puou)
set max-v max lista

ifelse max-v = Puu [set pcolor gray] [ifelse max-v = Pua [set pcolor yellow + 1] [ifelse max-v = Puf [set pcolor lime - 1]
[ifelse max-v = Pup [set pcolor yellow - 1]
[ifelse max-v = Pum [set pcolor magenta + 1] [ifelse max-v = Puov [set pcolor yellow + 3] [ifelse max-v = Puou [
set pcolor lime + 2 ] [ set pcolor yellow - 1]]]]]]]
]

if pcolor = magenta + 1      ;; si la célula es magenta + 1 (magenta + 1 ) es matorral y vale 5
[
```


Modelado y simulación de sistemas urbanos complejos basado en autómatas celulares.
Caso de estudio: Los cambios de usos del suelo y crecimiento urbano en el pueblo de Ajusco

```
set uso-suelo 5

set n-vecinos-urbano 0      ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo urbano
set n-vecinos-agricola 0   ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo agrícola
set n-vecinos-forestal 0  ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo forestal
set n-vecinos-pastizal 0  ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo pastizal
set n-vecinos-matorral 0  ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo matorral
set n-vecinos-otros-usos 0 ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo otros usos
set n-vecinos-otra-vegetacion 0 ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo otra
vegetación
set n-vecinos-vialidad 0   ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo vialidad

vecindad ;; procedimiento para asignar a la variable vecindario las celdas de acuerdo al tipo de vecindario (more o von
neumann)
tipos-vecinos ;; procedimiento para contabilizar el número de vecinos por tipo de uso de suelo
distancia-mas-cercana-a-vialidad ;; calcula la distancia mínima de la celda de análisis a la celda vialidad

set v calcular-v
set aj calcula-aj

set Puu precision ((v * aj * MaaUr * ( 1 + (n-vecinos-urbano * peso-urbano))) + Hu) 4
set Pua precision ((v * aj * MaaAg * ( 1 + (n-vecinos-agricola * peso-agricola ))) + Ha) 4
set Puf precision ((v * aj * MaaFo * ( 1 + (n-vecinos-forestal * peso-forestal ))) + Hf) 4
set Pup precision ((v * aj * MaaPa * ( 1 + (n-vecinos-pastizal * peso-pastizal ))) + Hp) 4
set Pum precision ((v * aj * MaaMa * ( 1 + (n-vecinos-matorral * peso-matorral))) + Hm) 4
set Puov precision ((v * aj * MaaOve * ( 1 + (n-vecinos-otra-vegetacion * peso-otra-vegetacion))) + Hov) 4
set Puou precision ((v * aj * MaaOUs * ( 1 + (n-vecinos-otros-usos * peso-otros-usos))) + Hou) 4

set lista (list Puu Pua Puf Pup Pum Puov Puou)
set max-v max lista

ifelse max-v = Puu [set pcolor gray] [ifelse max-v = Pua [set pcolor yellow + 1] [ifelse max-v = Puf [set pcolor lime - 1]
[ifelse max-v = Pup [set pcolor yellow - 1]
[ifelse max-v = Pum [set pcolor magenta + 1] [ifelse max-v = Puov [set pcolor yellow + 3] [ifelse max-v = Puou [
set pcolor lime + 2 ] [ set pcolor magenta + 1]]]]]]]
]
if pcolor = yellow + 3 ;; si la celula es amarillo + 3 (yellow + 3) es otra vegetacion y vale 6
[

set uso-suelo 6

set n-vecinos-urbano 0      ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo urbano
set n-vecinos-agricola 0   ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo agrícola
set n-vecinos-forestal 0  ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo forestal
set n-vecinos-pastizal 0  ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo pastizal
set n-vecinos-matorral 0  ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo matorral
set n-vecinos-otros-usos 0 ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo otros usos
set n-vecinos-otra-vegetacion 0 ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo otra
vegetación
set n-vecinos-vialidad 0   ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo vialidad

vecindad ;; procedimiento para asignar a la variable vecindario las celdas de acuerdo al tipo de vecindario (more o von
neumann)
tipos-vecinos ;; procedimiento para contabilizar el número de vecinos por tipo de uso de suelo
distancia-mas-cercana-a-vialidad ;; calcula la distancia mínima de la celda de análisis a la celda vialidad

set v calcular-v
set aj calcula-aj

set Puu precision ((v * aj * OVeaUr * ( 1 + (n-vecinos-urbano * peso-urbano))) + Hu) 4
set Pua precision ((v * aj * OVeaAg * ( 1 + (n-vecinos-agricola * peso-agricola ))) + Ha) 4
set Puf precision ((v * aj * OVeaFo * ( 1 + (n-vecinos-forestal * peso-forestal ))) + Hf) 4
set Pup precision ((v * aj * OVeaPa * ( 1 + (n-vecinos-pastizal * peso-pastizal ))) + Hp) 4
set Pum precision ((v * aj * OVeaMa * ( 1 + (n-vecinos-matorral * peso-matorral))) + Hm) 4
set Puov precision ((v * aj * OVeaOve * ( 1 + (n-vecinos-otra-vegetacion * peso-otra-vegetacion))) + Hov) 4
set Puou precision ((v * aj * OVeaOUs * ( 1 + (n-vecinos-otros-usos * peso-otros-usos))) + Hou) 4

set lista (list Puu Pua Puf Pup Pum Puov Puou)
set max-v max lista
```

Modelado y simulación de sistemas urbanos complejos basado en autómatas celulares.
Caso de estudio: Los cambios de usos del suelo y crecimiento urbano en el pueblo de Ajusco

```

ifelse max-v = Puu [set pcolor gray] [ifelse max-v = Pua [set pcolor yellow + 1] [ifelse max-v = Puf [set pcolor lime - 1]
[ifelse max-v = Pup [set pcolor yellow - 1]
    [ifelse max-v = Pum [set pcolor magenta + 1] [ifelse max-v = Puov [set pcolor yellow + 3] [ifelse max-v = Puou [
set pcolor lime + 2 ] [ set pcolor yellow + 3]]]]]]
]

if pcolor = lime + 2      ;; si la célula es lima + 2 (lime + 2) es otros usos y vale 7
[

set uso-suelo 7 ;; urbano=1 agricola=2 forestal=3 pastizal=4 matorral=5 otra-vegetacion=6 otros-usos=7 vialidad=8

set n-vecinos-urbano 0      ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo urbano
set n-vecinos-agricola 0    ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo agrícola
set n-vecinos-forestal 0   ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo forestal
set n-vecinos-pastizal 0   ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo pastizal
set n-vecinos-matorral 0   ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo matorral
set n-vecinos-otros-usos 0 ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo otros usos
set n-vecinos-otra-vegetacion 0 ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo otra
vegetacion
set n-vecinos-vialidad 0    ;; Se almacena el numero de las celdas vecinas que tengan usos de suelo vialidad

vecindad ;; procedimiento para asignar a la variable vecindario las celdas de acuerdo al tipo de vecindario (more o von
neumann)
tipos-vecinos ;; procedimiento para contabilizar el número de vecinos por tipo de uso de suelo
distancia-mas-cercana-a-vialidad ;; calcula la distancia mínima de la celda de análisis a la celda vialidad

set v calcular-v
set aj calcula-aj

set Puu precision ((v * aj * OUsaUr * ( 1 + (n-vecinos-urbano * peso-urbano))) + Hu) 4
set Pua precision ((v * aj * OUsaAg * ( 1 + (n-vecinos-agricola * peso-agricola ))) + Ha) 4
set Puf precision ((v * aj * OUsaFo * ( 1 + (n-vecinos-forestal * peso-forestal ))) + Hf) 4
set Pup precision ((v * aj * OUsaPa * ( 1 + (n-vecinos-pastizal * peso-pastizal ))) + Hp) 4
set Pum precision ((v * aj * OUsaMa * ( 1 + (n-vecinos-matorral * peso-matorral))) + Hm) 4
set Puov precision ((v * aj * OUsaOv * ( 1 + (n-vecinos-otra-vegetacion * peso-otra-vegetacion))) + Hov) 4
set Puou precision ((v * aj * OUsaOUs * ( 1 + (n-vecinos-otros-usos * peso-otros-usos))) + Hou) 4

set lista (list Puu Pua Puf Pup Pum Puov Puou)
set max-v max lista

ifelse max-v = Puu [set pcolor gray] [ifelse max-v = Pua [set pcolor yellow + 1] [ifelse max-v = Puf [set pcolor lime - 1]
[ifelse max-v = Pup [set pcolor yellow - 1]
    [ifelse max-v = Pum [set pcolor magenta + 1] [ifelse max-v = Puov [set pcolor yellow + 3] [ifelse max-v = Puou [
set pcolor lime + 2 ] [ set pcolor lime + 2]]]]]]
]
]

;; --- ojo --- esta parte va contabilizando en cada pasada, es muy lenta, pero va paso a paso
; set c-forestal-f count patches with [pcolor = lime - 1]
; set c-pastizal-f count patches with [pcolor = yellow - 1]
; set c-matorral-f count patches with [pcolor = magenta + 1]
; set c-otros-usos-f count patches with [pcolor = lime + 2]
; set c-agricola-f count patches with [pcolor = yellow + 1]
; set c-urbana-f count patches with [pcolor = gray]
; set c-otra-vegetacion-f count patches with [pcolor = yellow + 3]
; set c-vialidad-f count patches with [pcolor = 0]
; set c-totales-f count patches

.. ***** 1 pasada *****

if celda-analizada = 110226 [
export-view "salida88-1-1g-b-5.png"
contabiliza-celdas-finales
%-celdas-finales
actualiza-graficos
; export-plot URBANO "plot-salida88-1-1g.csv"
; export-all-plots "all-plots-salida88-1-1g.csv"
] ;; salva 1 simulacion

```

Modelado y simulación de sistemas urbanos complejos basado en autómatas celulares.
Caso de estudio: Los cambios de usos del suelo y crecimiento urbano en el pueblo de Ajusco

```
if celda-analizada = 220452 [  
  export-view "salida88-1-2g-b-5.png"  
  contabiliza-celdas-finales  
  %-celdas-finales  
  actualiza-graficos  
] ;; salva 1 simulacion
```

```
if celda-analizada = 330678 [  
  export-view "salida88-1-3g-b-5.png"  
  contabiliza-celdas-finales  
  %-celdas-finales  
  actualiza-graficos  
] ;; salva 1 simulacion
```

```
if celda-analizada = 440904 [  
  export-view "salida88-1-4g-b-5.png"  
  contabiliza-celdas-finales  
  %-celdas-finales  
  actualiza-graficos  
] ;; salva 1 simulacion
```

```
if celda-analizada = 551133 [  
  export-view "salida88-1-5tg-b-5.png"  
  contabiliza-celdas-finales  
  %-celdas-finales  
  actualiza-graficos  
] ;; salva 1 simulacion
```

```
;; ***** 2 pasada *****
```

```
if celda-analizada = 661359 [  
  export-view "salida88-2-1g-b-5.png"  
  contabiliza-celdas-finales  
  %-celdas-finales  
  actualiza-graficos  
] ;; salva 1 simulacion
```

```
if celda-analizada = 771585 [  
  export-view "salida88-2-2g-b-5.png"  
  contabiliza-celdas-finales  
  %-celdas-finales  
  actualiza-graficos  
] ;; salva 1 simulacion
```

```
if celda-analizada = 881811 [  
  export-view "salida88-2-3g-b-5.png"  
  contabiliza-celdas-finales  
  %-celdas-finales  
  actualiza-graficos  
] ;; salva 1 simulacion
```

```
if celda-analizada = 992037 [  
  export-view "salida88-2-4g-b-5.png"  
  contabiliza-celdas-finales  
  %-celdas-finales  
  actualiza-graficos  
] ;; salva 1 simulacion
```

```
if celda-analizada = 1102266 [  
  export-view "salida88-2-5tg-b-5.png"  
  contabiliza-celdas-finales  
  %-celdas-finales  
  actualiza-graficos  
] ;; salva 2 simulaciones
```

Modelado y simulación de sistemas urbanos complejos basado en autómatas celulares.
Caso de estudio: Los cambios de usos del suelo y crecimiento urbano en el pueblo de Ajusco

:: ***** 3 pasada *****

```
if celda-analizada = 1212492 [  
  export-view "salida88-3-1g-b-5.png"  
  contabiliza-celdas-finales  
  %-celdas-finales  
  actualiza-graficos  
] ;; salva 3 simulaciones
```

```
if celda-analizada = 1322718 [  
  export-view "salida88-3-2g-b-5.png"  
  contabiliza-celdas-finales  
  %-celdas-finales  
  actualiza-graficos  
] ;; salva 3 simulaciones
```

```
if celda-analizada = 1432944 [  
  export-view "salida88-3-3g-b-5.png"  
  contabiliza-celdas-finales  
  %-celdas-finales  
  actualiza-graficos  
] ;; salva 3 simulaciones
```

```
if celda-analizada = 1543170 [  
  export-view "salida88-3-4g-b-5.png"  
  contabiliza-celdas-finales  
  %-celdas-finales  
  actualiza-graficos  
] ;; salva 3 simulaciones
```

```
if celda-analizada = 1653399 [  
  export-view "salida88-3-5tg-b-5.png"  
  contabiliza-celdas-finales  
  %-celdas-finales  
  actualiza-graficos  
] ;; salva 3 simulaciones
```

:: ***** 4 pasada *****

```
if celda-analizada = 1763625 [  
  export-view "salida88-4-1g-b-5.png"  
  contabiliza-celdas-finales  
  %-celdas-finales  
  actualiza-graficos  
] ;; salva 4 simulaciones
```

```
if celda-analizada = 1873851 [  
  export-view "salida88-4-2g-b-5.png"  
  contabiliza-celdas-finales  
  %-celdas-finales  
  actualiza-graficos  
] ;; salva 4 simulaciones
```

```
if celda-analizada = 1984077 [  
  export-view "salida88-4-3g-b-5.png"  
  contabiliza-celdas-finales  
  %-celdas-finales  
  actualiza-graficos  
] ;; salva 4 simulaciones
```

```
if celda-analizada = 2094303 [  
  export-view "salida88-4-4g-b-5.png"  
  contabiliza-celdas-finales  
  %-celdas-finales  
  actualiza-graficos  
] ;; salva 4 simulaciones
```

```
if celda-analizada = 2204532 [  
  export-view "salida88-4-5tg-b-5.png"
```

Modelado y simulación de sistemas urbanos complejos basado en autómatas celulares.
Caso de estudio: Los cambios de usos del suelo y crecimiento urbano en el pueblo de Ajusco

```
contabiliza-celdas-finales
%-celdas-finales
actualiza-graficos
]    ;; salva 4 simulaciones

;; ***** 5 pasada *****

if celda-analizada = 2314758 [
  export-view "salida88-5-1g-b-5.png"
  contabiliza-celdas-finales
  %-celdas-finales
  actualiza-graficos
]    ;; salva 5 simulaciones

if celda-analizada = 2424984 [
  export-view "salida88-5-2g-b-5.png"
  contabiliza-celdas-finales
  %-celdas-finales
  actualiza-graficos
]    ;; salva 5 simulaciones

if celda-analizada = 2535210 [
  export-view "salida88-5-3g-b-5.png"
  contabiliza-celdas-finales
  %-celdas-finales
  actualiza-graficos
]    ;; salva 5 simulaciones

if celda-analizada = 2645436 [
  export-view "salida88-5-4g-b-5.png"
  contabiliza-celdas-finales
  %-celdas-finales
  actualiza-graficos
]    ;; salva 5 simulaciones

if celda-analizada = 2755665 [
  export-view "salida88-5-5tg-b-5.png"
  contabiliza-celdas-finales
  %-celdas-finales
  actualiza-graficos
]    ;; salva 5 simulaciones
]
tick
end

.....
..
..
..      FIN DE GO
..
..
.....

.....
..
..
..      INICIA SECCION DE PROCEDIMIENTOS
..
..
.....

to contabiliza-celdas-finales

  set c-forestal-f count patches with [pcolor = lime - 1]
  set c-pastizal-f count patches with [pcolor = yellow - 1]
  set c-matorral-f count patches with [pcolor = magenta + 1]
  set c-otros-usos-f count patches with [pcolor = lime + 2]
  set c-agricola-f count patches with [pcolor = yellow + 1]
  set c-urbana-f count patches with [pcolor = gray]
  set c-otra-vegetacion-f count patches with [pcolor = yellow + 3]
  set c-vialidad-f count patches with [pcolor = 0]
  set c-totales-f count patches
```

Modelado y simulación de sistemas urbanos complejos basado en autómatas celulares.
Caso de estudio: Los cambios de usos del suelo y crecimiento urbano en el pueblo de Ajusco

```
end

to %-celdas-finales

  set %-c-urbana-f (c-urbana-f / c-totales-f) * 100
  set %-c-agricola-f (c-agricola-f / c-totales-f) * 100
  set %-c-forestal-f (c-forestal-f / c-totales-f) * 100
  set %-c-pastizal-f (c-pastizal-f / c-totales-f) * 100
  set %-c-matorral-f (c-matorral-f / c-totales-f) * 100
  set %-c-otros-usos-f (c-otros-usos-f / c-totales-f) * 100
  set %-c-otra-vegetacion-f (c-otra-vegetacion-f / c-totales-f) * 100
  set %-c-vialidad-f (c-vialidad-f / c-totales-f) * 100
  set %-c-totales-f (c-totales-f / c-totales-f) * 100

end

to dibuja
  clear-drawing
  setup-world-envelope ;; pone todo a escala del raster de ajusco-dataset

;; sibuja el contorono del pueblo de ajusco en color rojo, el numero indica el grosor de la línea
gis:set-drawing-color red gis:draw contorno-dataset 1

ask patches
[
  if (pv-ajusco <= 0) or (pv-ajusco >= 0)
  [ set pcolor scale-color black pv-ajusco 0 9.9] ;; genera un plano de usos del suelo en escala de grises
  if (pv-vialidad <= 0) or (pv-vialidad >= 0)
  [ set pcolor black ]
]

pinta-usos-suelo ;; procedimiento para asignar un color a cada tipo de uso de suelo
cuenta-celdas-inciales ;; procedimiento para saber el número de celdas por el tipo de uso de suelo
end

to pinta-usos-suelo ;; poner un color de acuerdo al uso de suelo
ask patches
[if pcolor = 2.0202020202020203 ;;pinta-forestal verde - 1 if pcolor = lime - 1 set uso-suelo forestal
  [ set pcolor lime - 1]
if pcolor = 5.050505050505051 ;;pinta-pastizal amarillo - 1 if pcolor = yellow - 1 set uso-suelo pastizal
  [ set pcolor yellow - 1]
if pcolor = 1.0101010101010102 ;;pinta-matorral magenta if pcolor = magenta + 1 set uso-suelo matorral
  [ set pcolor magenta + 1]
if pcolor = 6.0606060606060606 ;;pinta-otros-usos verde + 1 if pcolor = lime + 2 set uso-suelo otros-usos
  [ set pcolor lime + 2]
if pcolor = 7.070707070707071 ;;pinta-otra-vegetacion amarillo + 3 if pcolor = yellow + 3 set uso-suelo otra-vegetacion
  [ set pcolor yellow + 3]
if pcolor = 4.040404040404041 ;;pinta-agricola amarillo + 1 if pcolor = yellow + 1 set uso-suelo agricola
  [ set pcolor yellow + 1]
if pcolor = 3.0303030303030303 ;;pinta-urbano -- if pcolor = gray set uso-suelo urbano
  [ set pcolor gray ]
if pcolor = 1.0101010101010102 ;;pinta-vialiad negro
  [ set pcolor 0 ]
]
end

to cuenta-celdas-inciales
set c-forestal-i count patches with [pcolor = lime - 1]
set c-pastizal-i count patches with [pcolor = yellow - 1]
set c-matorral-i count patches with [pcolor = magenta + 1]
set c-otros-usos-i count patches with [pcolor = lime + 2]
set c-agricola-i count patches with [pcolor = yellow + 1]
set c-urbana-i count patches with [pcolor = gray]
set c-otra-vegetacion-i count patches with [pcolor = yellow + 3]
set c-vialidad-i count patches with [pcolor = 0]
set c-totales-i count patches

set %-c-urbana-f (c-urbana-i / c-totales-i) * 100
set %-c-agricola-f (c-agricola-i / c-totales-i) * 100
```


Modelado y simulación de sistemas urbanos complejos basado en autómatas celulares.
Caso de estudio: Los cambios de usos del suelo y crecimiento urbano en el pueblo de Ajusco

```
[
  set rv rv + 1
  set vrv v-vialidad-von-neumann rv
]
]
[
  set rv 0           ;; procedimiento para ver cuál es la distancia y el radio de vecindad de vialidad más cercano
  set vrv []
  while [ vrv = [] ]
  [
    set rv rv + 1
    set vrv v-vialidad-moore rv
  ]
]
end

to-report von-neumann [n]
  let result [list pxcor pycor] of patches with [abs pxcor + abs pycor <= n]
  report remove [0 0] result
end

to-report moore [n]
  let result [list pxcor pycor] of patches with [abs pxcor <= n and abs pycor <= n]
  report remove [0 0] result
end

to-report von-neumann2 [n]
  let result [list pxcor pycor] of patches with [ (abs pxcor + abs pycor = n) or (abs pxcor + abs pycor <= n)]
  report remove [0 0] result
end

to-report moore2 [n]
  let result [list pxcor pycor] of patches with [ (abs pxcor <= n and abs pycor = n) or (abs pxcor = n and abs pycor <= n) ]
  report remove [0 0] result
end

to-report v-vialidad-von-neumann [n]
  let result [list pxcor pycor] of patches with [ ((abs pxcor + abs pycor = n) or (abs pxcor + abs pycor <= n)) and (pcolor = 0)]
  report remove [0 0] result
end

to-report v-vialidad-moore [n]
  let result [list pxcor pycor] of patches with [ ((abs pxcor <= n and abs pycor = n) or (abs pxcor = n and abs pycor <= n)) and
  (pcolor = 0) ]
  report remove [0 0] result
end

to tipos-vecinos

  set n-vecinos-forestal 0 set n-vecinos-pastizal 0 set n-vecinos-matorral 0 set n-vecinos-otros-usos 0
  set n-vecinos-agricola 0 set n-vecinos-urbano 0 set n-vecinos-otra-vegetacion 0 set n-vecinos-vialidad 0

  set nvfr2 0 set nvpr2 0 set nvmr2 0 set nvour2 0 set nvar2 0 set nvur2 0 set nvovr2 0 set nvvr2 0
  set nvfr3 0 set nvpr3 0 set nvmr3 0 set nvour3 0 set nvar3 0 set nvur3 0 set nvovr3 0 set nvvr3 0
  set nvfr4 0 set nvpr4 0 set nvmr4 0 set nvour4 0 set nvar4 0 set nvur4 0 set nvovr4 0 set nvvr4 0
  set nvfr5 0 set nvpr5 0 set nvmr5 0 set nvour5 0 set nvar5 0 set nvur5 0 set nvovr5 0 set nvvr5 0
  set nvfr6 0 set nvpr6 0 set nvmr6 0 set nvour6 0 set nvar6 0 set nvur6 0 set nvovr6 0 set nvvr6 0
  set nvfr7 0 set nvpr7 0 set nvmr7 0 set nvour7 0 set nvar7 0 set nvur7 0 set nvovr7 0 set nvvr7 0
  set nvfr8 0 set nvpr8 0 set nvmr8 0 set nvour8 0 set nvar8 0 set nvur8 0 set nvovr8 0 set nvvr8 0
  set nvfr9 0 set nvpr9 0 set nvmr9 0 set nvour9 0 set nvar9 0 set nvur9 0 set nvovr9 0 set nvvr9 0
  set nvfr10 0 set nvpr10 0 set nvmr10 0 set nvour10 0 set nvar10 0 set nvur10 0 set nvovr10 0 set nvvr10 0

  ask patches at-points vecindario
  [
    if pcolor = lime - 1 [ set n-vecinos-forestal n-vecinos-forestal + 1 ]
    if pcolor = yellow - 1 [ set n-vecinos-pastizal n-vecinos-pastizal + 1 ]
  ]
end
```


Modelado y simulación de sistemas urbanos complejos basado en autómatas celulares.
Caso de estudio: Los cambios de usos del suelo y crecimiento urbano en el pueblo de Ajusco

```
if pcolor = magenta + 1 [ set n-vecinos-matorral n-vecinos-matorral + 1 ]
if pcolor = lime + 2 [ set n-vecinos-otros-usos n-vecinos-otros-usos + 1 ]
if pcolor = yellow + 1 [ set n-vecinos-agricola n-vecinos-agricola + 1 ]
if pcolor = gray [ set n-vecinos-urbano n-vecinos-urbano + 1 ]
if pcolor = yellow + 3 [ set n-vecinos-otra-vegetacion n-vecinos-otra-vegetacion + 1 ]
if pcolor = 0 [ set n-vecinos-vialidad n-vecinos-vialidad + 1 ]
]

ifelse radio = 1
[ask patches at-points vr1
[
if pcolor = lime - 1 [ set nvfr1 nvfr1 + 1 ]
if pcolor = yellow - 1 [ set nvpr1 nvpr1 + 1 ]
if pcolor = magenta + 1 [ set nvmr1 nvmr1 + 1 ]
if pcolor = lime + 2 [ set nvour1 nvour1 + 1 ]
if pcolor = yellow + 1 [ set nvar1 nvar1 + 1 ]
if pcolor = gray [ set nvur1 nvur1 + 1 ]
if pcolor = yellow + 3 [ set nvovr1 nvovr1 + 1 ]
if pcolor = 0 [ set nvvr1 nvvr1 + 1 ]
]
]
]
ifelse radio = 2
[ask patches at-points vr2
[
if pcolor = lime - 1 [ set nvfr2 nvfr2 + 1 ]
if pcolor = yellow - 1 [ set nvpr2 nvpr2 + 1 ]
if pcolor = magenta + 1 [ set nvmr2 nvmr2 + 1 ]
if pcolor = lime + 2 [ set nvour2 nvour2 + 1 ]
if pcolor = yellow + 1 [ set nvar2 nvar2 + 1 ]
if pcolor = gray [ set nvur2 nvur2 + 1 ]
if pcolor = yellow + 3 [ set nvovr2 nvovr2 + 1 ]
if pcolor = 0 [ set nvvr2 nvvr2 + 1 ]
]
]
]
ifelse radio = 3
[ask patches at-points vr3
[
if pcolor = lime - 1 [ set nvfr3 nvfr3 + 1 ]
if pcolor = yellow - 1 [ set nvpr3 nvpr3 + 1 ]
if pcolor = magenta + 1 [ set nvmr3 nvmr3 + 1 ]
if pcolor = lime + 2 [ set nvour3 nvour3 + 1 ]
if pcolor = yellow + 1 [ set nvar3 nvar3 + 1 ]
if pcolor = gray [ set nvur3 nvur3 + 1 ]
if pcolor = yellow + 3 [ set nvovr3 nvovr3 + 1 ]
if pcolor = 0 [ set nvvr3 nvvr3 + 1 ]
]
]
]
ifelse radio = 4
[ask patches at-points vr4
[
if pcolor = lime - 1 [ set nvfr4 nvfr4 + 1 ]
if pcolor = yellow - 1 [ set nvpr4 nvpr4 + 1 ]
if pcolor = magenta + 1 [ set nvmr4 nvmr4 + 1 ]
if pcolor = lime + 2 [ set nvour4 nvour4 + 1 ]
if pcolor = yellow + 1 [ set nvar4 nvar4 + 1 ]
if pcolor = gray [ set nvur4 nvur4 + 1 ]
if pcolor = yellow + 3 [ set nvovr4 nvovr4 + 1 ]
if pcolor = 0 [ set nvvr4 nvvr4 + 1 ]
]
]
]
ifelse radio = 5
[ask patches at-points vr5
[
if pcolor = lime - 1 [ set nvfr5 nvfr5 + 1 ]
```

Modelado y simulación de sistemas urbanos complejos basado en autómatas celulares.
Caso de estudio: Los cambios de usos del suelo y crecimiento urbano en el pueblo de Ajusco

```
if pcolor = yellow - 1 [ set nvpr5 nvpr5 + 1 ]
if pcolor = magenta + 1 [ set nvmr5 nvmr5 + 1 ]
if pcolor = lime + 2 [ set nvour5 nvour5 + 1 ]
if pcolor = yellow + 1 [ set nvar5 nvar5 + 1 ]
if pcolor = gray [ set nvur5 nvur5 + 1 ]
if pcolor = yellow + 3 [ set nvovr5 nvovr5 + 1 ]
if pcolor = 0 [ set nvvr5 nvvr5 + 1 ]
]
]
[ifelse radio = 6
[ask patches at-points vr6
[
if pcolor = lime - 1 [ set nvfr6 nvfr6 + 1 ]
if pcolor = yellow - 1 [ set nvpr6 nvpr6 + 1 ]
if pcolor = magenta + 1 [ set nvmr6 nvmr6 + 1 ]
if pcolor = lime + 2 [ set nvour6 nvour6 + 1 ]
if pcolor = yellow + 1 [ set nvar6 nvar6 + 1 ]
if pcolor = gray [ set nvur6 nvur6 + 1 ]
if pcolor = yellow + 3 [ set nvovr6 nvovr6 + 1 ]
if pcolor = 0 [ set nvvr6 nvvr6 + 1 ]
]
]
[ifelse radio = 7
[ask patches at-points vr7
[
if pcolor = lime - 1 [ set nvfr7 nvfr7 + 1 ]
if pcolor = yellow - 1 [ set nvpr7 nvpr7 + 1 ]
if pcolor = magenta + 1 [ set nvmr7 nvmr7 + 1 ]
if pcolor = lime + 2 [ set nvour7 nvour7 + 1 ]
if pcolor = yellow + 1 [ set nvar7 nvar7 + 1 ]
if pcolor = gray [ set nvur7 nvur7 + 1 ]
if pcolor = yellow + 3 [ set nvovr7 nvovr7 + 1 ]
if pcolor = 0 [ set nvvr7 nvvr7 + 1 ]
]
]
[ifelse radio = 8
[ask patches at-points vr8
[
if pcolor = lime - 1 [ set nvfr8 nvfr8 + 1 ]
if pcolor = yellow - 1 [ set nvpr8 nvpr8 + 1 ]
if pcolor = magenta + 1 [ set nvmr8 nvmr8 + 1 ]
if pcolor = lime + 2 [ set nvour8 nvour8 + 1 ]
if pcolor = yellow + 1 [ set nvar8 nvar8 + 1 ]
if pcolor = gray [ set nvur8 nvur8 + 1 ]
if pcolor = yellow + 3 [ set nvovr8 nvovr8 + 1 ]
if pcolor = 0 [ set nvvr8 nvvr8 + 1 ]
]
]
[ifelse radio = 9
[ask patches at-points vr9
[
if pcolor = lime - 1 [ set nvfr9 nvfr9 + 1 ]
if pcolor = yellow - 1 [ set nvpr9 nvpr9 + 1 ]
if pcolor = magenta + 1 [ set nvmr9 nvmr9 + 1 ]
if pcolor = lime + 2 [ set nvour9 nvour9 + 1 ]
if pcolor = yellow + 1 [ set nvar9 nvar9 + 1 ]
if pcolor = gray [ set nvur9 nvur9 + 1 ]
if pcolor = yellow + 3 [ set nvovr9 nvovr9 + 1 ]
if pcolor = 0 [ set nvvr9 nvvr9 + 1 ]
]
]
]
[ask patches at-points vr10
[
if pcolor = lime - 1 [ set nvfr10 nvfr10 + 1 ]
```

Modelado y simulación de sistemas urbanos complejos basado en autómatas celulares.
Caso de estudio: Los cambios de usos del suelo y crecimiento urbano en el pueblo de Ajusco

```
if pcolor = yellow - 1 [ set nvpr10 nvpr10 + 1 ]
if pcolor = magenta + 1 [ set nvmr10 nvmr10 + 1 ]
if pcolor = lime + 2 [ set nvour10 nvour10 + 1 ]
if pcolor = yellow + 1 [ set nvar10 nvar10 + 1 ]
if pcolor = gray [ set nvur10 nvur10 + 1 ]
if pcolor = yellow + 3 [ set nvovr10 nvovr10 + 1 ]
if pcolor = 0 [ set nvvr10 nvvr10 + 1 ]
]
]]]]]]]]
end
```

to-report distancia ;; procedimiento para el cálculo de la distancia entre dos puntos

```
report precision (sqrt ((2 - 0) ^ 2 + (2 - 0) ^ 2) ) 2
```

end

to-report calcular-v

```
let result precision (1 + ((- ln (random-float 1)) ^ perturbacion)) 4 ;; asigna el valor a v
```

```
report result
```

end

to-report calcula-aj

```
ifelse uso-suelo = 1 [ set dju accesibilidad-urbano let result precision ((1 + (rv / dju)) ^ -1) 4 report result ]
[ifelse uso-suelo = 2 [ set dja accesibilidad-agricola let result precision ((1 + (rv / dja)) ^ -1) 4 report result ]
[ifelse uso-suelo = 3 [ set djf accesibilidad-forestal let result precision ((1 + (rv / djf)) ^ -1) 4 report result]
[ifelse uso-suelo = 4 [ set djp accesibilidad-pastizal let result precision ((1 + (rv / djp)) ^ -1) 4 report result]
[ifelse uso-suelo = 5 [ set djm accesibilidad-matorral let result precision ((1 + (rv / djm)) ^ -1) 4 report result]
[ifelse uso-suelo = 6 [ set djov accesibilidad-otra-vegetacion let result precision ((1 + (rv / djov)) ^ -1) 4 report result]
[ set djou accesibilidad-otros-usos let result precision ((1 + (rv / djou)) ^ -1) 4 report result]]]]]]]]
```

end

to actualiza-graficos

```
set-current-plot "URBANO"
plot %-c-urbana-f
set-current-plot "AGRICOLA"
plot %-c-agricola-f
set-current-plot "FORESTAL"
plot %-c-forestal-f
set-current-plot "PASTIZAL"
plot %-c-pastizal-f
set-current-plot "MATORRAL"
plot %-c-matorral-f
set-current-plot "OTROS USOS"
plot %-c-otros-usos-f
set-current-plot "OTRA VEGETACION"
plot %-c-otra-vegetacion-f
set-current-plot "VIALIDAD"
plot %-c-vialidad-f
end
```

```
.....
;;
;;
;;
;;
;;
FIN DE SECCION DE PROCEDIMIENTOS
;;
;;
.....
```

A.4. Clasificación de las teorías de los de usos del suelo y su cambio (Briassoulis, 2000)

A.4.1. Clasificación de las teorías del cambio de uso del suelo

En la literatura sobre el uso del suelo y su cambio, existe una gran variedad de teorías, donde se trata explícitamente el uso del suelo y es el objeto directo de la investigación teórica. Existen seis fuentes de información interrelacionadas para el estudio de los cambios de uso del suelo, en un orden decreciente de relevancia, se pueden distinguir:

1. El propósito del proyecto teórico
2. El enfoque teórico
3. La escala espacial y el nivel de agregación espacial adoptada
4. Los tipos de uso de la suelo considerados como el objeto principal del análisis
5. Los tipos de cambios de los usos del suelo, y
6. El tratamiento de la dimensión temporal (que en el caso del análisis del cambio, en general, es inherente a cualquier proyecto).

Por lo tanto, existen:

- a. Teorías descriptivas, explicativas y normativas
- b. Teorías individualista/conductista y teorías institucionalistas/estructuralista
- c. Las teorías de los cambios de uso del suelo urbano, regional y global
- d. Teorías de determinadas por los tipos de uso del suelo- sobre todo residenciales, industriales, terrenos agrícolas y forestales
- e. Teorías que dan prioridad a la situación económica o social o ambientales que determinantes del cambio de uso del suelo o combinaciones determinadas de ellos, y
- f. Teorías estática, cuasi-estáticas y dinámicos del cambio de uso del suelo (la teorías estática puede sonar contrario a la intuición del cambio).

Es, por tanto, evidente que, a efectos de la exposición sistemática de las teorías existentes, es necesario adoptar un esquema de clasificación como vehículo de presentación y discusión de estas teorías.

El tema estudiado es el mismo para muchas disciplinas (que pueden tener intereses y perspectivas particulares), las teorías se filtran de una disciplina a la otra - por ejemplo, desde la economía a la geografía, los límites disciplinarios son borrosos, especialmente en los tiempos modernos, cuando también hay una tendencia hacia la investigación interdisciplinaria. Por lo tanto, se tomó la decisión de adoptar un esquema de clasificación basado en un criterio global.

Con base en el criterio en las teorías tradicionales, se clasificaron las teorías existentes del cambio de uso del suelo en tres categorías principales:

- a. Teorías económicas urbanas y regionales
- b. Teorías sociológicas (y la economía política), y
- c. Teorías sociedad-naturaleza (u hombre-naturaleza).

Dentro de cada una de estas tres categorías principales, las teorías pueden ser clasificadas de acuerdo a criterios más particulares. En la tabla A.4.1.a se presentan las teorías que pertenecen a cada uno de las tres categorías. En las tablas A.4.1.b, A.4.1.c, y A.4.1.d se muestran las teorías por cada categoría, según los criterios determinados para cada categoría. A medida que estas tablas se muestran, se revela que es difícil proporcionar una clasificación ordenada de las teorías, como algo más que un criterio que puede ser utilizado para su clasificación.

Por lo tanto, algunos conceptos teóricos son incluidos en más de un grupos o categorías dentro de los grupos. Para cada teoría, las siguientes cuestiones principales deben ser respondidas: **propósito** (descriptivo, predictivo, exploratorio o prescriptivo), **el modo de teorizar** (supuestos, el tipo de uso del suelo y sus determinantes que toman en cuenta, especialmente el mecanismo propuesto para el cambio de uso de suelo), **la escala espacial**, y la **dimensión temporal** (duración, dinámica).

A.4.1.a. Clasificación de las teorías de los usos del suelo

Categorías tradicionales de teorías	Enfoques representativos
Teorías Económicas Urbanas y Regionales (Ciencias Regionales)	<ul style="list-style-type: none"> • Enfoque teórico Microeconómico • Enfoque teórico Macroeconómico • Otros enfoques teóricos en las Ciencias Regionales
Teorías Sociológicas (y Político-Económicas)	<ul style="list-style-type: none"> • Enfoque teórico Funcionalista-Conductista • Enfoque teórico Institucionalista-Estructuralista • Enfoque teórico Centro-Periferia • Enfoque teórico de Intercambio Desigual • Enfoque teórico Desarrollo Desigual – Lógica del Capital
Teorías Sociedad-Naturaleza (Hombre-Medio Ambiente u Hombre-Naturaleza)	<ul style="list-style-type: none"> • Enfoque teórico basado en la Humanidad • Enfoque teórico basado en las Ciencias Naturales • Enfoque teórico basado en las Ciencias Sociales

A.4.1.b. Enfoques teóricos económicos urbanos y regionales de los usos del suelo

Enfoque teórico Microeconómico	
<ul style="list-style-type: none"> • Teoría de la Renta de la Tierra Agrícola (von Thunen 1966; iniciada en 1826) • Teoría del Mercado del Suelo Urbano (Alonso 1964) • Teoría basadas en agentes de la estructura espacial urbana y regional (Henderson y Mitra 1996, Krugman 1995, Anas et al. 1998, Fujita et al. 1999) 	
Enfoque teórico Macroeconómico	
Teoría del equilibrio económico espacial	<ul style="list-style-type: none"> • A. Weber (1929) • Losch (1954) (ver también a Isard et al. 1969, Takayama y Labys 1986, Anderson y Kuenne 1986, Ginsburgh y Keyzer 1997)
Teoría del desequilibrio regional	Teoría de las causalidades acumulativas (Myrdal 1957) Teoría de los Polos de Crecimiento (Perroux 1955, Boudeville 1966)
Teoría del desarrollo regional Keynesiano	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo Harrod-Domar • Modelo basado en las exportaciones • Modelo Factores-Exportación • Modelos de crecimiento Multiregional Neoclásicos (ver también a Cooke 1983, Hoover y Giarratani 1984, 1999, Anderson y Kuenne 1986, Bennett y Hordijk 1986)
Otros enfoques teóricos en las Ciencias Regionales	
<ul style="list-style-type: none"> • Enfoque teórico Físico-Social (Reilly 1931, Stewart 1950, Wilson y Bennett 1986, Isard 1999) • Enfoque teórico Urbano y Regional Ecologista (Matemático) (Wilson 1981, Dendrinis y Mallaly 1985, Nijkamp y Reggiani 1998) 	

A.4.1.c. Enfoques teóricos Sociedad-Naturaleza de los usos del suelo

Enfoque teórico basado en la Humanidad	<ul style="list-style-type: none"> • Tesis de frontera (F. J. Turner 1894, Richards 1990) • Teorías antropologías y geográficas medio ambientales/culturales <ul style="list-style-type: none"> ○ Estructuralismo (Levi-Strauss 1963, Tuan 1971, Graber 1976) ○ Antropología cognitiva (Rapoport 1976) • Psicología medio ambiental (Boulding 1956, Lynch 1960 y otros)
Enfoque teórico basado en las Ciencias Naturales	<ul style="list-style-type: none"> • Determinismo medio ambiental (Hipócrates, Aristóteles, Montesquieu, McHarg 1969) • Ecología Cultural (o Humana) (Steward 1955, Rappaport 1968, Bennett 1976, Ellen 1982, Rambo 1983) • La Escuela de Berkeley (Geografía) (Saber 1925 y otros)
Enfoque teórico basado en las Ciencias Sociales	<ul style="list-style-type: none"> • Teoría de la cultura del consumo masivo (Sack 1990) • Revolución Ecológica (Merchant 1990) • Enfoques Multi-disciplinarios – Concepto del Equilibrio Ecologista (Compton 1972, Meadows 1972, Ehrlich y Ehrlich 1990, Coccossis 1991, Lutz 1994, Mayer y Tirner 1994)

A.4.1.d. Enfoques teóricos sociológicos para los usos del suelo

Enfoque teórico Funcionalista- Conductista	Teorías Ecológicas Humanas: <ul style="list-style-type: none"> • Teoría de zonas concéntricas (Burgess 1925) • Teoría de sectores radiales (Hoyt 1939) • Teoría de núcleos múltiples (McKenzie 1933, Harris y Ullman 1945) • Concepto de ocupaciones posteriores (Whittlesey 1929) Teorías de Planificación: <ul style="list-style-type: none"> • Teoría de la Estructura Espacial Metropolitana de Foley (Foley 1964) • Teoría del ámbito del lugar urbano y el no lugar (Webber 1964) • Teoría del Sistema de Actividades (Chapin 1965)
Enfoque teórico Institucionalcita- Estructuralista	<ul style="list-style-type: none"> • Los Movimientos sociales urbanos (Castells 1977) • Teoría de los nexos del Suelo Urbano (Scout 1980) • Teoría de la crisis y el capitalismo tardío (Harvey 1973, 1975a, 1975b, 1982)
Enfoque teórico Centro-Periferia	<ul style="list-style-type: none"> • Teoría de la modernización (Lewis 1955) • Teoría de las etapas del crecimiento económico (Rostov 1960) • Modelo Centro Periferia (Friedmann 1966) • Colonialismo interno (Hechter 1975) • Teoría del Sistema Mundial (Wallerstein 1974, 1979)
Enfoque teórico de Intercambio Desigual y Dependencias	<ul style="list-style-type: none"> • Teoría del Intercambio Desigual (Emmanuel 1972) • Teoría del Desarrollo Desigual (Amin 1976, 1978) • Teoría de la Dependencia (Frank 1969-79, Dos Santos 1970, Cardoso 1973)
Enfoque teórico del Desarrollo Desigual – Lógica del Capital	<ul style="list-style-type: none"> • Teoría del Intercambio Regional Desigual (Lipietz 1977, 1980) • Teoría de la División Espacial de la mano de Obra (Massey 1984) • Teoría del Desarrollo Desigual (Smith 1990)

A.5. Clasificación de los modelos de los usos del suelo y su cambio (Briassoulis, 2000)

Existen un gran número y variedad de modelos de cambio de uso del suelo donde se tratan el uso del suelo y su cambio de forma explícita y son el objeto directo de la elaboración de modelos. Ocho fuentes interrelacionadas, en un orden más o menos decreciente de importancia, se puede discernir en los modelos existentes:

1. El propósito para el cual se construye el modelo,
2. La teoría (o la falta de ella) en la que se basa el modelo (lo que refleja, en parte, los tipos de los factores determinantes del cambio de uso del suelo tomadas en cuenta),
3. La escala espacial y el nivel de agregación espacial adoptada, así como
4. El grado de "claridad espacial" del modelo,
5. Los tipos de uso del suelo considerados como los objetos principales de análisis,
6. Los tipos procesos considerados para el cambio de uso del suelo,
7. El tratamiento de la dimensión temporal (que en el caso del análisis del cambio, en general, debería ser inherente a cualquier proyecto), y
8. Las técnicas de solución que se utilice.

Por lo tanto, existen:

- a. Modelos descriptivo, explicativo, prescriptivo, predictivo y de evaluación del impacto
- b. Modelos de la teoría microeconómica y macroeconómica, modelos basados en la teoría gravitatoria o de interacción espacial, los modelos integrados, así como modelos de una sola teoría
- c. Modelos a nivel local, regional, interregional, nacional y mundial
- d. Modelos geo-referenciados (totalmente explícitos espacialmente) y los no geo-referenciada (espacialmente incompletos)
- e. Modelos por sector urbano (principalmente residencial), agrícolas (cultivos), forestal, etc.
- f. Modelos de la deforestación, la urbanización, modelos, etc.
- g. Modelos estáticos, cuasi-estáticos (o cuasi-dinámico) y dinámica
- h. Modelos estadísticos, de programación, del tipo gravitatorios, de simulación y modelos integrados.

Por tanto, evidente que es necesario adoptar un esquema de clasificación como método de presentación y de estudio de estos modelos.

La clasificación que se puede realizar de acuerdo a las ocho fuentes antes mencionadas, puede ser muy ambigua por varias razones. El mismo tema puede ser modelado en diferentes niveles de detalle espacial empleando las

teorías correspondientes (por ejemplo, micro o macro economía), así como dentro del marco teórico estáticos o dinámico. Además, el mismo problema que aborda un modelo puede ser estudiado por medio de más de una técnicas de modelización y/o diseños del modelo. Las especificaciones del modelo para el mismo problema en estudio pueden tener variaciones desde muy simples hasta muy sofisticados.

Por lo tanto, se adoptó un esquema de clasificación basado en los siguientes criterios: integrador, con un criterio compuesto, el modelado tradicional al que pertenece el modelo. Este criterio se rige por la característica dominante del diseño del modelo y la técnica de solución que es más relevante para la construcción de modelos, lo que permite discriminar entre diferentes tipos de modelos. Por otra parte, el diseño del modelo se asocia generalmente con el propósito particular del modelo, las teorías subyacentes y los tipos de uso del suelo en el modelo (y, por lo general, la disciplina donde se originan los modelos), y los niveles de análisis espacial y temporal.

Con base en este criterio, las cuatro categorías principales de los modelos que se distinguen son:

- a. Modelos estadísticos y econométricos
- b. Modelos de interacción espacial
- c. Modelos de optimización, y
- d. Modelos integrados.

Una quinta categoría se ha añadido la cual contiene los modelos en los que la clasificación no es sencilla.

Dentro de cada una de las clasificaciones más generales de los modelos, los modelos se clasifican de acuerdo a criterios particulares de cada clasificación y están ordenados, cronológicamente, desde los modelos iniciales hasta los modelos más recientes. Dado que la clasificación anterior tiene un criterio compuesto, es probable que varios modelos puedan ser clasificadas en más de una categoría (por ejemplo, los modelos de interacción espacial que se puede considerar como modelos de simulación o de programación o modelos integrados que se pueden clasificar como modelos de simulación, etc.).

Una selección de modelos que pertenecen a cada categoría que se presenta y son evaluados en base de las siguientes características y criterios del modelo:

- El propósito o fin (descripción, explicación, predicción, prescripción, evaluación de impacto).
- Cuando son agregados (a), por criterio espacial (b), por sectores/uso del suelo (c), y criterio temporales
- Cuando los modelos son: dinámica (estática, cuasi-estática, dinámica)

- Por la teoría subyacente - la conceptualización de la naturaleza de la zona de estudio, los usos del suelo (tipos de uso del suelo), los determinantes del uso del suelo considerados, así como sus relaciones
- Especificación/forma de uso del modelo - la representación espacial, tipos de variables, (incluyendo las variables de política), las relaciones de funcionamiento, la técnica de solución
- Los datos utilizados – espacialmente si son explícitos frente a los que no son explícitos, los problemas de calidad de los datos, disponibilidad
- La aplicación en el mundo real - en su caso - por ejemplo, para apoyar las decisiones políticas

La Tabla A.5.a contiene los principales grupos de modelos. Para más detalles ver: Tablas A.5.b , A.5.c y A.5.d. Se presenta esta clasificación como ayuda para futuras investigaciones, y solo se explicara más a fondo la clasificación de modelo al cual pertenecen los modelos basados en Autómatas Celulares.

Tabla A.5.a. Clasificación de modelos para los usos del suelo y su cambio

Categorías tradicionales de modelado	Modelos representativos
Modelos Estadísticos y Econométricos	<ul style="list-style-type: none"> • Modelos de Regresión Lineal • Modelos Econométricos (EMPIRIC) • Modelos Multinomial Logit • Modelos de Análisis de Correlación Canónicos
Modelos de interacción Espacial	<ul style="list-style-type: none"> • Modelos de Potencial • Modelos Intervención de Oportunidades • Modelos de Interacción Espacial/Gravitacionales
Modelos de Optimización	<ul style="list-style-type: none"> • Modelos de Programación Lineal – Simples y Multi-objetivos • Programación Dinámica • Programación por metas, Programación jerárquica, Problemas de asignación Lineal y Cuadrática, Modelos de Programación No lineal • Modelos de Maximización de Utilidades • Modelos de decisión de mercado Multi-objetivo/Multi-criterio
Modelos integrados	<ul style="list-style-type: none"> • Modelos Integrados del tipo econométricos • Modelos integrados del tipo ... • Modelos integrados de simulación <ul style="list-style-type: none"> ○ Modelos de Simulación a nivel Urbano/Metropolitano ○ Modelos de Simulación a nivel Regional ○ Modelos de Simulación a nivel global • Modelos integrados basados en Entrada-Salida
Otros enfoques de modelos	<ul style="list-style-type: none"> • Enfoque de modelado orientado a las ciencias naturales • Cadenas de Markov para el modelado de los cambios del usos del suelo • Modelado basados en SIG para el cambio de los usos del suelo.

A.5.b. Modelos econométricos y estadísticos, de optimización y de interacción espacial para los usos del suelo y su cambio.

Modelado tradicional	Modelos representativos
Modelos Econométricos y Estadísticos	<ul style="list-style-type: none"> • Modelos de Regresión Lineal (Chapin 1965, Chapin y Weiss 1968, Lee 1973, Veldkamp y Fresco 1996, Verburg et al. 1997) • EMPIRIC (Hill 1965) • Modelos Multinomial Logit (Kitamura et al. 1997, Morita et al. 1997) • Modelos de Análisis de Correlación Canónicos (Hoshino 1996)
Modelos de Interacción Espacial	<ul style="list-style-type: none"> • Modelos de Potencial (Hansen 1959) • Modelos de Intervención de Oportunidades (Stouffer 1940, Schneider 1959, Lathrop y Hamburg 1965) • Modelos de Interacción Espacial/Gravitacionales (Niedercorn y Bechdolt 1969, Golob y Beckmann 1971, Lee 1973, Wilson 1974, Batty 1976, Haynes y Fotheringham 1984, Batten y Boyce 1986)
Modelos de Optimización	<ul style="list-style-type: none"> • Modelos de Programación Lineal – Simple y Multi-objetivos • Modelo de Programación Lineal Herbert-Stevens (Herbert y Stevens 1960) <ul style="list-style-type: none"> ○ Modelos de Plan Regional Southern Wisconsin (Schlager 1965) ○ Modelo de Programación Lineal Multi-Objetivo (Comisión de Planeación Regional del Condado de Du Page, Bammi et al. 1976) ○ Modelos de Programación Lineal para Regiones Agrícolas (Campbell et al. 1992, Stoorvogel et al. 1995) ○ Modelos de Asignación Óptima General de los Modelos de Usos del Suelo (Latesteijn 1995) • Programación Dinámica (Hopkins et al. 1978) • Programación basada en objetivos (Lonergan y Prudham 1991) • Programación jerárquica (Nijkamp 1980) • Problema de asignación Lineal y Cuadrática (Moore y Gordon 1990, Moore 1991) • Modelos de Programación no Lineal (Adams et al. 1994) • Modelos de Maximización-Utilidad (Wingo 1961, Alonso 1964, Muth 1961, 1969, Mills 1967, 1972) • Modelos para la Toma de Decisiones Multi- Criterios/Multi-Objetivos (Janssen 1991, Fischer et al. 1996b)

A.5.c. Tabla de Modelos Integrados para los usos del suelo y su cambio

Modelos tradicionales	Modelos representativos
Modelos Integrados	<ul style="list-style-type: none"> • Modelos Integrados del tipo Econométricos <ul style="list-style-type: none"> ○ Penn-Jersey (Seidman 1969, Wilson 1974) • Modelos Integrados de Interacción espacial-gravitacional del tipo Lowry <ul style="list-style-type: none"> ○ Modelo de Lowry (1964) y versiones anteriores (Garin, 1966) ○ TOMM (Crecine 1964, 1968) ○ PLUM (Goldner et al, 1971) ○ Modelo de actividades población urbana (Echenique et al, 1969) ○ Modelo de asignación de actividades y de valores (Batty 1976) • Modelos Integrados de Simulación <ul style="list-style-type: none"> ○ Modelos de Simulación a nivel Urbano/Metropolitano <ul style="list-style-type: none"> ▪ San Francisco CRP (Rothenberg-Pack 1978) ▪ Modelos de simulación urbana: UI, NBER, HUDS (Kain 1986) ▪ CUFM (Landis 1994, 1995) ▪ Modelos de Simulación Dinamica <ul style="list-style-type: none"> • El Modelos Dortmund (Wegener 1982) • Modelos Integrados de Usos del Suelo/Transporte <ul style="list-style-type: none"> ○ ITLUP (Putman 1983, 1991) ○ TRANUS (de la Barra 1989) ○ CATLAS (Anas 1982, 1983) ○ Modelos de Simulación a nivel Regional <ul style="list-style-type: none"> ▪ CLUE-CR (Veldkamp y Fresco, 1996) ▪ Autómatas Celulares (White y Engelen, 1994, Engelen et al. 1995) ▪ LUC (Fischer et al. 1996a) ▪ IMPEL (Rounsevell, 1999) ○ Modelos de Simulación a nivel Global <ul style="list-style-type: none"> ▪ IFS (Liverman, 1989) ▪ IMAGE 2.0 (Alcamo, 1994) • Modelos Integrados basados en Entrada-Salida <ul style="list-style-type: none"> ○ Modelos Compactos de E-S <ul style="list-style-type: none"> ▪ Modelo Mundial U.N. (Leontief, 1977) ▪ Modelo Económico-Ecológico (Daly 1968, Isard 1972, Víctor 1972) ○ Modelos Modular con un componente de E-S <ul style="list-style-type: none"> ▪ Modelo PDE para Mauritius (Lutz, 1994a)

A.5.d. Otros enfoques de modelado para el análisis de los usos del suelo y su cambio

Modelado Tradicional	Modelos Representativos
Otros enfoques de modelado	<ul style="list-style-type: none">• Enfoques de Modelado Orientados a las Ciencias Naturales<ul style="list-style-type: none">○ Enfoque de Modelado Ecológico (Turner et. al. 1995)<ul style="list-style-type: none">▪ Modelos de Ecosistemas y Vegetación▪ Modelos del sector Forestal▪ Modelos de la erosión del suelo▪ Modelos del impacto del cambio climático• Modelos basados en cadenas de Markov para el Cambio de Usos del Suelo (Clark 1965, Drewett 1969, Bell 1974, 1975, Bell e Hinojosa 1977, Bourne 1971, Vandever y Drummond 1978, Logsdon et al. 1996)• Modelos basados en SIG para el cambio de uso del suelo (Aspinall 1994, Longley y Batty 1996, Fischer y Nijkamp 1996, Liverman et al. 1998)

A.6. Marco Jurídico: Usos del suelo a nivel Federal y el D.F.

En el presente anexo se hará un resumen de las principales Artículos, Leyes y Normas aplicables a la planeación de usos del suelo a nivel Federal y del D.F.

A.6.1 Nivel Federal

A.6.1.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos

Las leyes y normas de los usos de suelo emanan en primera instancia de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

Artículo 27 Constitucional:

La propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional, corresponde originariamente a la nación, la cual ha tenido y tiene el derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares, constituyendo la propiedad privada.

La nación tendrá en todo tiempo el derecho de imponer a la propiedad privada las modalidades que dicte el interés público, así como el de regular, en beneficio social, el aprovechamiento de los elementos naturales susceptibles de apropiación, con objeto de hacer una distribución equitativa de la riqueza pública, cuidar de su conservación, lograr el desarrollo equilibrado del país y el mejoramiento de las condiciones de vida de la población rural y urbana. **En consecuencia, se dictaran las medidas necesarias para ordenar los asentamientos humanos y establecer adecuadas provisiones, usos, reservas y destinos de tierras, aguas y bosques**, a efecto de ejecutar obras públicas y de planear y regular la fundación, conservación, mejoramiento y crecimiento de los centros de población; para preservar y restaurar el equilibrio ecológico; para el fraccionamiento de los latifundios; para disponer, en los términos de la ley reglamentaria, la organización y explotación colectiva de los ejidos y comunidades; para el desarrollo de la pequeña propiedad rural; para el fomento de la agricultura, de la ganadería, de la selvicultura y de las demás actividades económicas en el medio rural, y para evitar la destrucción de los elementos naturales y los daños que la propiedad pueda sufrir en perjuicio de la sociedad.

A.6.1.2 Ley General de Asentamientos Humanos

En segunda instancia esta la Ley General de Asentamientos Humanos:

Artículo 1º, párrafo 3 establece que tiene por objetivo:

III. Definir los principios para determinar las provisiones, reservas, **usos** y destinos de áreas y predios que regulen la propiedad en los centros de población, y

ARTICULO 2o.- Para los efectos de esta Ley, se entenderá por:

XV. Provisiones: las áreas que serán utilizadas para la fundación de un centro de población;

XVI. Reservas: las áreas de un centro de población que serán utilizadas para su crecimiento;

XIX. Usos: los fines particulares a que podrán dedicarse determinadas zonas o predios de un centro de población;

XXI. Zonificación: la determinación de las áreas que integran y delimitan un centro de población; sus aprovechamientos predominantes y las reservas, usos y destinos, así como la delimitación de las áreas de conservación, mejoramiento y crecimiento del mismo.

A.6.1.3 Ley de Planeación

Artículo 1o.- Las disposiciones de esta Ley son de orden público e interés social y tienen por objeto establecer:

I.- Las normas y principios básicos conforme a los cuales se llevará a cabo la Planeación Nacional del Desarrollo y encauzar, en función de ésta, las actividades de la administración Pública Federal;

II.- Las bases de integración y funcionamiento del Sistema Nacional de Planeación Democrática;

III.- Las bases para que el Ejecutivo Federal coordine sus actividades de planeación con las entidades federativas, conforme a la legislación aplicable;

IV. Las bases para promover y garantizar la participación democrática de los diversos grupos sociales así como de los pueblos y comunidades indígenas, a través de sus representantes y autoridades, en la elaboración del Plan y los programas a que se refiere esta Ley, y

V.- Las bases para que las acciones de los particulares contribuyan a alcanzar los objetivos y prioridades del plan y los programas.

A.6.1.4 Plan Nacional de Desarrollo (2007-2012)

El Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012, se presenta, en cumplimiento al Artículo 26 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos y se ha elaborado de acuerdo a lo establecido en la Ley de Planeación.

El Plan Nacional de Desarrollo tiene como finalidad establecer los objetivos nacionales, las estrategias y las prioridades que deberán regir la acción del gobierno, de tal forma que ésta tenga un rumbo y una dirección clara. El Plan establece los objetivos y estrategias nacionales que serán la base para los programas sectoriales, especiales, institucionales y regionales que emanan de éste.

Pobreza

Objetivo 1: Reducir significativamente el número de mexicanos en condiciones de pobreza con políticas públicas que superen un enfoque asistencialista, de modo que las personas puedan adquirir capacidades y generar oportunidades de trabajo.

ESTRATEGIA 1.3 Asegurar que los mexicanos en situación de pobreza resuelvan sus necesidades de alimentación y vivienda digna, con pleno acceso a servicios básicos y a una educación y salud de calidad.

... Para enfrentar estas manifestaciones de la pobreza, **se impulsará la adquisición de suelo formal y se reforzarán los programas de regularización de tierras ejidales y comunales, así como de terrenos nacionales ocupados**, siempre con una visión de sustentabilidad ambiental.

Objetivo 3: Lograr un patrón territorial nacional que frene la expansión desordenada de las ciudades, provea suelo apto para el desarrollo urbano y facilite el acceso a servicios y equipamientos en comunidades tanto urbanas como rurales.

ESTRATEGIA 3.1 Promover el ordenamiento territorial, la certeza jurídica en la tenencia de la tierra y la seguridad pública en zonas marginadas de las ciudades. Se trabajará estrechamente con las autoridades estatales y municipales para acelerar la regularización de los predios en que las familias han construido sus hogares sin realizar los trámites correspondientes.

Una vez regularizados los asentamientos, incluida la definición de usos del suelo con fines habitacionales y comerciales, será más fácil dotarlos de servicios completos y atraer inversiones que sean detonadoras de creación de empleos...

ESTRATEGIA 3.4 Fortalecer el marco institucional federal en materia de desarrollo urbano creando los instrumentos financieros, técnicos y normativos que requiere la problemática actual de nuestras ciudades.

La planeación y gestión del desarrollo urbano, si bien es una atribución legal de los gobiernos municipales y estatales, requiere de un marco institucional federal fuerte, con elevada capacidad técnica y financiera para apoyar oportuna y eficazmente a los gobiernos locales. En particular, se necesita un marco institucional sólido para estructurar los centros de población y hacerlos más compactos, definir normas y lineamientos, y constituir un sistema de información y transferencia de buenas prácticas en red.

La acción pública sobre las ciudades es una tarea que involucra a diferentes organismos y dependencias de los tres órdenes de gobierno y a la propia sociedad, razón por la cual se dará el impulso necesario a la construcción del andamiaje institucional que permita y garantice el diseño y la conducción de una efectiva política nacional de suelo y desarrollo urbano.

A.6.2 Nivel Estatal

A.6.2.1 Ley de Desarrollo Urbano del D.F. (15 de Julio 2010)

Para tener un correcto desarrollo la ciudad de México cuenta con la Ley de Desarrollo Urbano del Distrito Federal, y establece su objetivo en su artículo 1.

Artículo 1.- Las disposiciones de la presente ley son de orden público e interés general y social que tienen por **objeto** establecer las bases de la política urbana del Distrito Federal, mediante la regulación de su ordenamiento territorial y que contemple la protección de los derechos a la Ciudad de México, el crecimiento urbano controlado y la función del desarrollo sustentable de la propiedad urbana, en beneficio de las generaciones presente y futuras del Distrito Federal.

Para cumplir con esta Ley cada delegación tiene un **Programa Parcial de Desarrollo Urbano**, además de programas especiales llamados: Programas Especiales de Desarrollo Urbano Controlado, para áreas específicas de la ciudad que requieren un tratamiento especial (como el Centro Histórico). Y la herramienta básica con que se realizan las políticas globales y parciales en la Normatividad de Uso del Suelo, es decir, los usos y destinos de los terrenos y las edificaciones.

Normatividad de Uso de Suelo

Son una serie de restricciones en el uso y explotación del suelo urbano o no urbano, es decir, en una primera instancia establece cuáles zonas son para uso urbano, uso agrícola o reserva ecológica, así como los límites del crecimiento de la ciudad. Posteriormente dentro del uso del suelo urbano, establece cuál debe ser el destino de las edificaciones por género (habitacional, comercial, equipamiento

cultural, equipamiento para la salud, mixto, etc.) y por intensidad de uso (número de pisos y densidad de población); y lograr así un uso y crecimiento racional y armónico del territorio.

Los objetivos de las normas son:

- Determinar los destinos, usos y reservas de tierras y sus construcciones,
- Distribuir equitativamente los beneficios y cargas del proceso de desarrollo urbano.
- Dictar y tomar las medidas necesarias para evitar la especulación excesiva de los terrenos.
- Evitar la especulación excesiva de los terrenos y de los inmuebles dedicados a la vivienda popular.
- Promover acciones tendientes a la integración social de los habitantes.
- Inscribir en el registro del Programa y enviar para su inscripción en el Registro Público de la Propiedad y Comercio todas aquellas resoluciones que de acuerdo con la Ley así lo ameriten.

Principales artículos de la Ley de Desarrollo Urbano del D.F. que inciden en los usos del suelo:

Artículo 2.- Son principios generales para la realización del objeto de la presente ley, los siguientes:

VI. Limitar la existencia de zonas unifuncionales, a través del fomento del establecimiento de áreas geográficas con diferentes **usos del suelo**, que permita una mejor distribución poblacional, la disminución de traslados y el óptimo aprovechamiento de servicios públicos e infraestructura urbana y la compatibilidad de la expansión urbana con la sustentabilidad ambiental, social y económica;

XXII. Polígono de actuación: Superficie delimitada del suelo integrada por uno o más predios, que se determina en los Programas a solicitud de la Administración Pública, o a solicitud de los particulares, para la realización de proyectos urbanos mediante la relotificación y relocalización de **usos de suelo** y destinos;

Capítulo Segundo - Del Suelo y de la Zonificación

Artículo 9. El Registro de Planes y Programas de Desarrollo Urbano es la unidad administrativa de la Secretaría que tiene por objeto:

II. Integrar el registro estadístico de información de usos de suelo por lote, colonia, zona y Delegación;

IV. Expedir certificados en materia de usos de suelo a partir de la información contenida en el acervo registral.

Capítulo Tercero - De los Programas

Artículo 42.- Las modificaciones de los programas para cambiar el uso del suelo urbano en predios particulares, para destinarlos al comercio, servicios de bajo impacto urbano o a la micro y pequeña industria, se sujetarán al siguiente procedimiento:

Artículo 45. Los **usos del suelo** que se establezcan en los programas o en las determinaciones administrativas que se dicten en aplicación de esta Ley, respetarán los derechos adquiridos por los propietarios o poseedores de predios, o sus causahabientes, que de manera continua y legítima hayan aprovechado esos usos, en su totalidad o en unidades identificables, en los supuestos que se establezcan en el reglamento. Los derechos adquiridos prescribirán al término de un año en que se deje de ejercer el uso de que se trate.

Capítulo Quinto - De las normas de ordenación

Artículo 47. Las normas de ordenación establecerán las especificaciones para los **usos** y aprovechamientos del **suelo**. La Secretaría las expedirá en los términos que señalen esta ley y su reglamento.

Título Cuarto - Del ordenamiento territorial

Capítulo Primero - Disposiciones generales

Artículo 48. El ordenamiento territorial comprende el conjunto de disposiciones que tienen por objeto establecer la relación entre la zonificación y los **usos**, destinos y reservas del suelo del Distrito Federal, los asentamientos humanos, las actividades de los habitantes y las normas de ordenación. Comprende asimismo las disposiciones en materia de construcciones, de paisaje urbano y de equipamiento urbano.

Artículo 50. Dentro de las áreas de actuación, podrán establecerse polígonos de actuación, ajustándose a los Programas y a las determinaciones de los órganos centrales de la Administración Pública que resulten competentes conforme a esta Ley.

El reglamento establecerá el número, objeto y denominación de las áreas de actuación, entre las cuales se encontrarán:

I. En suelo urbano:

- a) Áreas con potencial de desarrollo;
- b) Áreas con potencial de mejoramiento;
- c) Áreas con potencial de reciclamiento;
- d) Áreas de conservación patrimonial; y

e) Áreas de integración metropolitana;

II. En **suelo de conservación**:

- a) Áreas de rescate ecológico;
- b) Áreas de preservación ecológica;
- c) Áreas de producción rural y agroindustrial;
- d) Áreas de transición;
- e) Áreas de conservación patrimonial; y
- f) Las determinadas en el Programa General de Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal

Artículo 51. Para la zonificación del territorio del Distrito Federal se considerarán las siguientes zonas y **usos del suelo**:

- I. En suelo urbano: Habitacional; Comercial; De Servicios; Industrial; Espacio Abierto; Áreas Verdes, y los demás que se establezcan en el reglamento.
- II. En suelo de conservación: Turístico; Recreación; Forestal; Piscícola; Equipamiento rural, Agrícola; Pecuaria; Agroindustrial, áreas de valor ambiental, áreas naturales protegidas y los demás que establezca el reglamento;
- III. En poblados rurales: Habitacional Rural de Baja Densidad; Habitacional Rural; Habitacional Rural con Comercio y Servicios; Equipamiento Rural, y los demás que establezca el reglamento.
- IV. Las combinaciones que surjan de los anteriores, las cuales deberán estar clasificadas en los Programas correspondientes.

Las características específicas de las diferentes zonas y usos del suelo, se establecerán en el reglamento y Programas correspondientes.

Las acciones sobre la zonificación quedarán determinadas en los Programas correspondientes.

La zonificación determinará los usos, destinos y reservas de suelo para las diversas zonas, así como la especificación de aquellos usos sujetos a dictamen de impacto urbano.

Los **usos del suelo** se clasificarán en el reglamento y se reproducirán a detalle en los Programas respectivos.

Título Quinto - De la Ejecución de los Instrumentos de Planeación

Capítulo Primero - De los Polígonos de Actuación

Artículo 76. La ejecución de los Programas estará a cargo de las autoridades competentes con arreglo a la presente Ley y al Reglamento.

La ejecución de los programas se podrá llevar a cabo mediante la constitución de polígonos de actuación. En los polígonos de actuación, para la ejecución de proyectos específicos, se podrá aplicar la relotificación y, en su caso, relocalizar los usos y destinos del suelo dentro del mismo polígono, conforme a lo dispuesto en el reglamento. Asimismo se podrán constituir servidumbres legales sobre el inmueble, conforme a las disposiciones de derecho común vigentes.

Los polígonos de actuación se pueden constituir:

- I. Por un predio o dos o más predios colindantes, en cuyo caso será necesario presentar una manifestación ante la Secretaría, por parte del o los propietarios del o los inmuebles ubicados en el mismo, así como por el perito en desarrollo urbano; y
- II. Por dos o más predios no colindantes, en cuyo caso deberán ser autorizados por la Secretaría, por medio de un dictamen.

A.6.3 Nivel Delegacional y local

A.6.3.1 Tlalpan: Programa Delegacional de Desarrollo Urbano 2010

Usos del Suelo

Suelo Urbano

En Tlalpan existen 5,023 hectáreas de Suelo Urbano de las cuales el uso del suelo habitacional es el que muestra mayor predominio, concentrando el 65.25% del total, es decir 3,277.37 hectáreas, continuando con los usos habitacionales, el habitacional con comercio y habitacional con oficinas cuentan con una superficie de 171.34 hectáreas (3.41%) y 3.23 hectáreas (0.06%) respectivamente. En suma, los usos del suelo que contienen un componente habitacional acumulan 3,451.94 hectáreas, siendo estas poco más del 69% del total de la superficie urbana delegacional.

Por su parte, los usos de suelo que alojan actividades económicas cuentan con una superficie total de 250.59 ha (4.99% del total del área urbana), de las cuales el uso comercial es del 50.29%, el mixto 30.80% y el Industrial el restante 18.91%.

Los usos del suelo con fines públicos, es decir, plazas, parques y jardines, el equipamiento público y privado y las áreas verdes (Fuentes Brotantes, Loreto y Peña Pobre, Zona Arqueológica de Cuicuilco y el Bosque de Tlalpan) representan respectivamente el 4.96%, 8.35% y 5.95%, sumando 967 ha.

Finalmente, los baldíos urbanos, ocupan una superficie de 101.89 ha (2.03%) y se localizan principalmente en la Zona I.

La tabla A.6.3.a, muestra la dosificación de los actuales usos del Suelo Urbanos.

Tabla A.6.3.a. Distribución de usos del suelo

Uso	Superficie	
	ha	%
Habitacional	3,277.37	65.24
Programas Parciales de Desarrollo Urbano	251.56	5.01
Plazas, Parques y Jardines	249.04	4.96
Equipamiento	419.20	8.35
Habitacional con Comercio	171.34	3.41
Comercial	126.03	2.51
Baldíos	101.89	2.03
Mixto	77.18	1.54
Industrial	47.38	0.94
Habitacional con Oficinas	3.23	0.06
Áreas Verdes	298.80	5.95
TOTAL	5,023.00	100.00

Fuente: Levantamiento de campo de la Delegación Tlalpan 2004.

Considerando las 5 Zonas Territoriales localizadas en el área urbana de la Delegación, se observa como el uso de suelo habitacional es predominante en cada una de ellas, sin embargo, se identifican diferencias como se describe a continuación.

ZONA 1

Es la zona que concentra mayor superficie de usos del Suelo Urbanos (2,439.83 has.), de éstas el 49.11% son áreas destinadas al uso del suelo habitacional, 8.94% a plazas parques y jardines, 10.50% de su superficie son Programas Parciales y el 11.31% se considera de equipamiento.

Por su parte, en comparación con las otras tres analizadas, la zona 1 concentra el 61.67% mixto, el 77.83% de plazas parques y jardines, el 60.67% de los baldíos y el 100% de los Programas Parciales y áreas verdes.

ZONA 2

Se localiza en el área de Coapa y cuenta con una superficie de 937.57 hectáreas, en ella predomina el uso del suelo habitacional (72.64%) pero también posee una importante concentración de usos del suelo comerciales y de equipamiento (6.75% y 8.01% respectivamente).

En el ámbito urbano delegacional, posee el 50.40% de la superficie con usos del suelo comerciales así como el 7.91% de la superficie Industrial, lo que significa que es esta zona tiene una importante especialización en comercio e Industria a nivel delegacional.

ZONA 3

Es la zona relativa a Padierna y la Miguel Hidalgo y cuenta con una superficie de 1,119.44 hectáreas. Ésta es un área predominantemente habitacional aunque también muestra considerables proporciones de uso del suelo habitacional con comercio, equipamiento y usos comerciales, asimismo se observa un claro déficit de plazas, parques y jardines que tan solo representan el 0.68% de la superficie total, es decir 7.60 hectáreas.

A nivel delegacional, la Zona Territorial número 3 concentra el 38.14% de las 171.33 hectáreas con uso de suelo habitacional con comercio, así como el 47.68% de la superficie destinada al uso del suelo habitacional con oficinas que en total se estima en 3.23 hectáreas.

ZONA 4

La Zona se localiza al sur de la línea del ferrocarril de Cuernavaca en donde se ubican las colonias Lomas de Cuilotepec, Dos de Octubre, Belvedere entre otras, ocupa una superficie de 383.57 hectáreas, la menor de las cuatro áreas administrativas en Suelo Urbano, ésta tiene una superficie importante de uso habitacional y habitacional con comercio (el 90.80% y 4.71% respectivamente). A nivel delegacional, cuenta con el 10.63% del uso habitacional con comercio y el 12.23% del habitacional. La Tabla N° 12 resume los datos expuestos con anterioridad.

ZONA 5

Aunque en su mayor parte, se localiza en Suelo de Conservación, el pueblo de San Pedro Mártir, se ubica al norte de la línea de conservación ecológica, es decir, pertenece al Suelo Urbano.

El área descrita tiene una superficie de 152.85 ha, de las cuales el 58.14% son Habitacionales, 17.97% Habitacionales con Comercio y 10.75% de Equipamiento y 3.94 de Plazas Parques y Jardines. En general estas áreas concentran el 16.7% del uso habitacional con comercio con respecto al área urbana.

Tabla A10.3.b. Superficie de usos del suelo urbanos por zonas territoriales

USO	ZONA 1		ZONA 2		ZONA 3		ZONA 4		ZONA 5 (*)	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Área Verde	298.8	12.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Baldíos	62.13	2.55	13.88	1.48	17.08	1.53	6.07	1.58	2.73	1.78
Comercial	35.29	1.45	63.32	6.75	15.21	1.36	0.57	0.15	10.24	6.69
Equipamiento	276.02	11.31	75.07	8.01	42.80	3.82	8.86	2.31	16.44	10.75
Habitacional	1,198.26	49.11	681.03	72.64	960.93	85.84	348.28	90.80	88.87	58.14
Habitacional con Comercio]	45.07	1.85	15.37	1.64	65.34	5.83	18.07	4.71	27.48	17.97
Habitacional con Oficinas	1.52	0.06	0.17	0.02	1.54	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00
Industrial	6.39	0.26	34.43	3.67	5.46	0.49	0.00	0.00	1.09	0.59
Mixto	47.65	1.95	25.78	2.75	3.47	0.31	0.27	0.07	0.01	0.006
Plazas, Parques y Jardines	217.15	8.90	28.52	3.04	7.60	0.68	1.44	0.38	5.99	3.92
Programas Parciales de Desarrollo Urbano	251.56	10.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TOTAL ZONA	2,439.84	100.00	937.57	100.00	1,119.43	100.00	383.56	100.00	152.85	100.00

Fuente: PDDU Tlalpan 2010.

Dentro del Suelo Urbano es de gran importancia considerar las áreas verdes urbanas, las cuales ocupan una superficie de 456.61 ha, lo que corresponde al 9.09% del Suelo Urbano de la entidad. Dicha superficie comprende las dos Áreas Naturales Protegidas (Bosque de Tlalpan y Fuentes Brotantes de Tlalpan), el Parque Eoarqueológico de Cuicuilco, el Parque Ecológico Loreto y Peña Pobre y las áreas verdes menores (jardines, camellones y glorietas) ubicadas dentro del Suelo Urbano. Tlalpan cuenta con 41 camellones (506,441 m²) y 40 jardines (321,932 m²) que ocupan el 1% y 0.64% respectivamente de la zona urbana. Estas áreas, en particular las áreas verdes mayores, albergan un importante número de especies vegetales y animales característicos de la zona, sin embargo, se han visto afectadas por la contaminación del aire, suelo y agua, la deforestación y en algunos casos, por la invasión del suelo natural por asentamientos humanos.

A partir de la superficie total de las áreas verdes se calculó que para la demarcación se tienen 7.84 m² de área verdes por habitante. Como referencia, la Organización Mundial de la Salud sugiere como mínimo 9.0 m²/habitante.

Suelo de Conservación

En general, dentro del Suelo de Conservación se localizan: Siete Poblados Rurales; 6 Programas Parciales de Desarrollo Urbano; y Asentamientos Humanos Irregulares.

A la fecha poco más del 52% del Suelo de Conservación (13,268 hectáreas), es de vegetación natural de valor ambiental. En cuanto al suelo utilizado para la realización de actividades primarias, se estima que en total existen 7,912.39 hectáreas destinadas a estas actividades, lo que representa el 31.12% del Suelo de Conservación.

También, en este suelo concurren usos urbanos localizados principalmente en los poblados rurales, en donde existen unas 1,158.05 y 200.39 hectáreas con usos habitacionales y habitacionales con comercio respectivamente, además de 14.93 hectáreas de comercio rural, 10.92 hectáreas de Industria rural y 417.41 hectáreas de equipamiento rural que incluyen al Colegio Militar (386.97 ha).

Tabla A.6.3.c. Distribución de usos del suelo

Uso	Superficie	
	ha	%
Habitacional Rural	1,158.05	4.55
Habitacional Rural con Comercio y	200.39	0.79
Comercio Rural	14.93	0.06
Mixto Rural	1.88	0.01
Baldíos en Zona Rural	214.40	0.84
Plazas, Parques y Jardines en Zona Rural	22.10	0.09
Equipamiento Rural	417.41	1.64
Industria Rural	10.92	0.04
Vegetación Natural con Valor Ambiental	13,268.56	52.19
Zona Erosionada (Altamente Perturbada)	1,370.84	5.39
Zona Agropecuaria	7,912.39	31.12
Programas Parciales de Desarrollo Urbano	834.13	3.28
TOTAL	25,426.00	100.00

Fuente: Fotointerpretación y Levantamiento de campo 2004.

Así mismo, se cuenta con cinco Áreas Naturales Protegidas (ANP) y ocupan una superficie de 2,220.29 ha, lo que representa el 8.73% de la superficie de la entidad están distribuidas en dos parques nacionales, una zona sujeta a conservación ecológica, y una fracción de superficie decretada como Corredor Biológico Ajusco Chichinautzin con la categoría de área de protección de flora y fauna silvestre. De ellas, únicamente dos se encuentran en Suelo Urbano: Bosque Urbano de Tlalpan y Parque Nacional Fuentes Brotantes de Tlalpan. La función de estas Áreas Naturales para la protección de la biodiversidad y para la generación de bienes y servicios ambientales es de la mayor importancia para el beneficio de los

habitantes de toda la Cuenca de México ya que albergan un gran número de especies de flora y fauna silvestres y otros recursos naturales que proporcionan bienes y servicios ambientales a los habitantes de esta Delegación.

Tabla A.6.3.d. Áreas Naturales Protegidas en Tlalpan

Nombre	Categoría	Competencia	Sup. (ha)
SUELO DE CONSERVACIÓN			
Cumbres del Ajusco	Parque Nacional	SEMARNAT	920.00
Parque Ecológico de la Ciudad de México	Zona Sujeta a Conservación Ecológica	GDF/SMA	727.61
Corredor Biológico Chichinautzin	Área de Protección de Flora y Fauna Silvestre	SEMARNAT	302.00
SUBTOTAL			1,949.61
SUELO URBANO			
Bosque de Tlalpan	Parque Urbano	GDF/SMA	252.86
Fuentes Brotantes de Tlalpan (1)	Parque Nacional	SEMARNAT	17.82
SUBTOTAL			270.68
TOTAL ANP'S			2,220.29

Nota: (1) La superficie original decretada del Parque Nacional es de 129.0 ha, por diversos factores se redujo a 17.82 ha.

A.7. Raíz del error cuadrático medio - Root Mean Square Error - RMSE

Pronóstico

Pronóstico es el proceso de estimación en situaciones de incertidumbre.

Precisión del pronóstico: El error del pronóstico es la diferencia entre el valor real y el pronosticado del período correspondiente.

$$E_t = R_t - P_t$$

Donde E_t es el error del pronóstico del período t , R_t es el valor real para ese período y P_t el valor que se había pronosticado.

Medidas de error:

Existe varios métodos para calcular el error de un pronóstico, entre ellos tenemos: Error absoluto de la media (MAD), Error absoluto porcentual de la media (MAPE), Desviación porcentual absoluta de la media (PMAD), **Error cuadrático medio (MSE), Raíz del error cuadrático medio (RMSE).**

El error cuadrático medio - MSE (Mean Square Error)

El error cuadrático medio (ECM), o MSE, es una medida del cuadrado del error entre dos valores $X_{observada}$ y $X_{modelada}$. Este error es la cantidad que uno de los valores difiere con respecto del otro, y viene dado por la expresión siguiente:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{observado,i} - X_{modelo,i})^2$$

Raíz del error cuadrático medio – RMSE (Root Mean Square Error)

La raíz del error cuadrático medio (RMSE) (también llamado la raíz de la desviación cuadrático media, RMSD) es una medida de uso frecuente para calcular la diferencia o el error entre los valores pronosticados por un modelo y los valores observados realmente en el medio ambiente que se está modelando. Estas diferencias individuales son también llamados residuos, y el RMSE sirve para agregarlos en una sola medida con capacidad de predicción.

El RMSE de una variable $X_{observada}$ con respecto a una variable $X_{modelada}$ de un modelo de predicción o pronóstico se define como la raíz cuadrada del error cuadrático medio:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{observado,i} - X_{modelo,i})^2} = \sqrt{MSE}$$

donde $X_{observado,i}$ son los valores observados o reales y $X_{modelo,i}$ son los valores modelados (predichos o pronosticados) en el tiempo o lugar i .

El RMSE es una medida de uso frecuente de las diferencias entre los valores predichos por un modelo o un estimador y los valores realmente observados. Se extrae la raíz cuadrada del MSE para volver a la unidad de medida original.

Al aplicar este método a una imagen real u observada y otra imagen modelada o pronosticada, nos dice que tanto difiere una con respecto a la otra.

Normalización de la raíz del error cuadrático medio

El valor normalizado del error cuadrático medio (NRMSE) es el RMSE dividido por el rango de valores observados, o:

$$NRMSE = \frac{RMSE}{X_{observado,max} - X_{observado,min}}$$

El valor puede ser expresado en porcentaje.