
**Modelización de la expansión urbana y su impacto en el paisaje natural mediante
Sistemas de Información Geográfica y Autómatas Celulares.
Caso de estudio: Tandil, Argentina**

**Modeling of urban expansion and its impact on the natural landscape through
Geographic Information Systems and Cellular Automata.
Case study: Tandil, Argentina**

Santiago Linares¹ y Natasha Picone¹

¹Centro de Investigaciones Geográficas (CIG) y Departamento de Geografía, Facultad de Ciencias Humanas, UNCPBA e Instituto de Geografía, Historia y Ciencias Sociales (IGEHCs), CONICET, UNCPBA

E-mail: slinares@fch.unicen.edu.ar

LINARES, S. & PICONE, N. (2018). Modelización de la expansión urbana y su impacto en el paisaje natural mediante Sistemas de Información Geográfica y Autómatas Celulares. Caso de estudio: Tandil, Argentina. *Revista Estudios Ambientales*, 6(1), 5-25.

Recibido: 8 de enero de 2018

Aceptado: 11 de abril de 2018

Publicado: 30 de junio de 2018

RESUMEN

Los impactos ambientales del proceso de urbanización son una preocupación constante en la comunidad. Dichos procesos generan impactos sobre los ecosistemas, los recursos hídricos, el clima y en la salud de su población. Poder conocer cuáles son los posibles escenarios de urbanización y los probables impactos sobre el ambiente es central para poder generar planes de ordenamiento territorial que mejoren la sustentabilidad de dicho proceso. La modelización de procesos urbanos a partir de autómatas celulares permite el estudio de procesos complejos con modelos simples. La combinación de modelos de autómatas celulares y Sistemas de Información Geográfica presenta una gran potencialidad para analizar estos procesos.

Este trabajo propone modelizar los cambios de usos del suelo en espacios urbanos con el propósito de conocer el impacto del crecimiento urbano en la conservación del paisaje natural. Para ello se utilizó el software LanduseSim y ArcGIS para simular un escenario proyectivo (2033) de las tendencias actuales de crecimiento para la ciudad de Tandil y analizar la distribución espacial de estos procesos sobre el área a conservar. Dicha área urbana presenta por Ley Provincial el área de Paisaje Protegido Tandil, el cual centra su protección en el sistema serrano que rodea la ciudad.

Los resultados mostraron que, de seguir el actual ritmo de crecimiento y sus características, la ciudad aumentaría su área urbanizada unas 1.632 ha. De ese crecimiento el 75 % se produciría sobre áreas no edificadas a densificar, pero el 25 % restante se produciría sobre el área de paisaje natural protegido. Esto significaría una pérdida del 10 % del total del área de Paisaje Protegido, con una reducción significativa de los servicios ecosistémicos que el mismo brinda al área.

Palabras clave: paisaje protegido, modelo de autómatas celulares, escenarios de cambio de uso de suelo.

ABSTRACT

The environmental impacts of the urbanization process are a constant concern in the community. These processes generate impacts on ecosystems, water resources, climate and the health of the population. To understand the possible scenarios for urbanization and its environmental impacts are central to generate development policies that improve the process sustainability. Using cellular automata models to study

urban processes allows understanding very complex behaviour with only simple models. The combination of cellular automata and GIS models presents a great potential to analyse these processes.

This work proposes to model land use changes in urban spaces to know the impacts of urban growth in the natural landscape preservation. LanduseSim and ArcGIS software were used to simulate a projective model (2033) with current trends of Tandil city growth, to then analyze the spatial distribution of these processes over conservation area. This urban area has a landscape protected area provincial law, which focused its protection on the hills system that surrounds the city.

The results showed that, continuing the currents trends of growth and their characteristics will increase the city urbanized area by 1632 ha. The 75 % of these growing will occur over non-built-up areas that ae meant to be densify, but the remaining 25% will occur over the protected natural landscape area. This would mean a 10% loss of protected landscape, with a significant reduction of ecosystem services that it provides to the area.

Key words: protected landscape, cellular automata model, land use change scenarios.

INTRODUCCIÓN

Los cambios de uso de suelo urbano y su dinámica tienen gran impacto sobre los ecosistemas, la biodiversidad, los recursos hídricos, las emisiones de gases, el clima urbano, el escurrimiento superficial, el transporte y la accesibilidad, la salud y el mercado del suelo, entre otros aspectos (Lambin y Geist, 2008). Todos estos deben ser analizados y entendidos para realizar y actualizar la planificación y el ordenamiento territorial.

En el desarrollo de planes de uso de suelo se tiene por objetivo reducir el impacto negativo de las dinámicas socio espaciales mediante la regulación de las necesidades y acciones de la sociedad en un territorio específico, y así generar los menores impactos sobre los servicios ecosistémicos, el hábitat, los recursos hídricos, el clima, entre otros. En la actualidad estos planes de desarrollo se centran en la noción de desarrollo urbano sustentable mediante la integración de actores políticos, científicos y la participación ciudadana (Randolph, 2004).

A fin de conocer cuáles pueden ser los impactos de distintos patrones de cambios de

usos de suelo es que se opta por la generación de escenarios futuros. Dentro de los estudios más frecuentes se incluyen escenarios que buscan entender los posibles impactos de la expansión sobre los ecosistemas y las áreas protegidas (Lu et., 2015), sobre los recursos hídricos (Kumar et al., 2013, Pérez et al, 2017) y sobre el clima (Lu et al., 2017a, Lu et al, 2017b) entre otros. A partir de dichos resultados se pueden anticipar y prevenir problemas que podrían traer formas de crecimiento y cambios de uso de suelo, generando de esta manera ciudades más sustentables.

Existen diversas herramientas computacionales para generar escenarios de expansión urbana. Algunas de las modelizaciones más utilizadas son: la basada en autómatas celulares, la que se realiza mediante redes neuronales artificiales, la basada en fractales, la que se hace mediante regresión lineal o logística, la basada en agentes y la que se efectúa mediante árboles de decisión (Triantaskontastis y Moutrakis, 2012). Los autómatas celulares resultan ser los más implementados en la literatura especializada (Batty et al., 1999, Clark et al., 1997) y son definidos como sistemas dinámicos discretos, representados por una matriz en donde cada celda (célula) representa un uso del suelo y se encuentra interrelacionadas con las demás, esa interacción local es la que produce el patrón global de expansión urbana (White, 1997). Generalmente, el estado de cada celda en el futuro dependerá tanto de su estado anterior, así como del valor de sus celdas vecinas, de acuerdo a reglas de transición establecidas. Los autómatas celulares resuelven el problema de modelizar estructuras urbanas no-lineales (complejas) e introducen procesos interactivos que generan patrones espaciales fractales, aproximándose mucho más a las dinámicas urbanas que predominan en la actualidad (White y Engelen 1993).

Según Clark (2013) existen numerosas potencialidades de estos modelos en el análisis de procesos urbanos. Entre las más destacadas se encuentran: la capacidad de reproducir comportamientos complejos con modelos simples; la experimentación con la herramienta es más barata y no implica una intervención directa en el espacio; tiene un impacto muy importante en el planeamiento urbano y existe una gran cantidad de modelos desarrollados para el estudio particular de ciudades.

Existen interesantes aplicaciones de metodologías de modelización sobre la morfología urbana, en las cuales se asocia el crecimiento urbano y su vinculación con la sustentabilidad. En ellos indaga por ejemplo si las ciudades más compactas son más o menos sustentables que las ciudades fragmentadas (Polidori, 2007). También

hay estudios de modelización de impacto ambiental a través de modelos de cambios de uso de suelo (Veldkamp and Verburg, 2004), los cuales presentan un gran potencial para aportar al ordenamiento territorial.

Sin embargo, a pesar de haberse consolidado una tradición de estudios sobre modelización de escenarios de expansión urbana y sus implicancias socio-espaciales y ambientales en diferentes ciudades del mundo (Santé et al., 2010; Arsanjani, et al., 2013; Moghadamy Helbich, 2013; Berberoğlu et al., 2016; Henríquez, 2014), esto no ha sucedido en ciudades argentinas. Esta herramienta es central para la toma de decisiones espaciales, ya que permite modelar distintos escenarios de crecimiento y cuáles son los impactos de cada uno de ellos. Existe tres tipos de modelos: el primero de ellos se realiza a partir de los patrones actuales de crecimiento (predictivo); el segundo, conocido como exploratorio, es aquel en el cual se varían las reglas de cambio según el resultado buscado; por último, utilizando una serie de parámetros determinados para obtener los resultados deseados se obtienen los escenarios normativos.

El trabajo se centra en analizar la aplicación de estas herramientas en Tandil, ciudad media de la provincia de Buenos Aires que ha tenido un crecimiento muy importante en los últimos 20 años. En vista de ordenar este crecimiento, en el año 2005 se aprueba el Plan de Desarrollo Territorial de Tandil (PDT). Dentro del mismo y debido a su valor como patrimonio natural, todas las zonas que superan los 200 msnm en el área rural y los 220 en el área circundante a la ciudad son declarados como Zona Especial de Interés Ambiental, denominada Zona Protegida Sierra de Tandil (Figura 1). Para la regulación de los usos en dicha zona se establecen una serie de usos según cota, pero se manifiesta la necesidad de realizar un Plan de Manejo del Área. En el año 2010 la legislatura bonaerense declara al área como Paisaje Protegido N° 14126 al área comprendida por la Poligonal que se forma dentro de las intersecciones de la Ruta 226, 74 y 30. Esto vuelve a impulsar el desarrollo del plan de manejo, pero aún no se cuenta con dicho instrumento (Fernández Equiza, 2017).

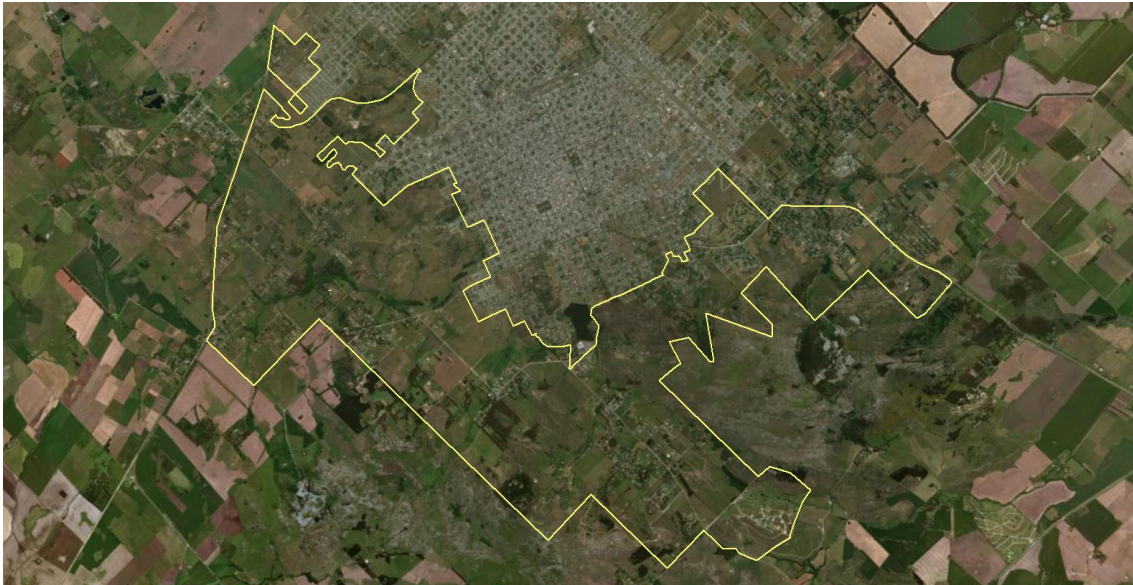


Figura 1. Zona Protegida Sierra de Tandil

El objetivo del siguiente estudio es mostrar cuál sería el escenario futuro de crecimiento y expansión urbana de la ciudad de Tandil para el año 2033 y evaluar el impacto de los cambios de usos del suelo sobre el área determinada como paisaje protegido. A tal fin se integrarán dos tipos de programas informáticos: modelos de autómatas celulares y Sistemas de Información Geográfica.

METODOLOGÍA

Para desarrollo de este trabajo se han utilizado el LanduseSim® (Pratomoatmojo, 2016) y su complemento para ArcGIS 10®. En ellos se simuló el crecimiento de la ciudad de Tandil en un periodo de 30 años (2003-2033) siguiendo los patrones actuales de crecimiento y utilizando la normativa del PDT como rectora. El procedimiento constó básicamente de tres etapas: la primera en la cual se prepararon los parámetros del modelo, la segunda en la que se validó y calibró para que el mismo sea representativo del crecimiento real; mientras que la última fue la simulación para el periodo deseado.

Preparación del modelo

La preparación de los parámetros de la simulación consiste en varias etapas. La primera consiste en elaborar un mapa de uso de suelos que se relaciona con el objetivo seleccionado. Para este caso particular, con el fin de observar el avance del

área construida sobre el paisaje protegido se elaboró un mapa de uso de suelo con cuatro usos: Construido (1), No Construido (2), Paisaje protegido (3) y Equipamiento y recreación (4). El área de trabajo se delimitó utilizando el área de complementaria y urbana del Plan de Desarrollo Territorial Tandil (Municipio de Tandil, 2005). Dentro de dicha área, el área de Paisaje Protegido se delimitó utilizando la cota de 220 msnm, mientras que la incorporación del último uso se realizó para incorporar la restricción de construcción sobre los mismos. Para determinar que se encontraba construido y que no, en el punto de partida de la simulación, se utilizó una imagen satelital Landsat 5 TM del 03/11/2003. El área construida se determinó por método de firmas espectrales (Picone y Linares, 2014), unificando tres clases de densidades de construcción. El área que no estaba representada por ninguno de los tres usos anteriores se la clasificó como No Construida. El mapa final tiene una resolución espacial del pixel de 60 metros.

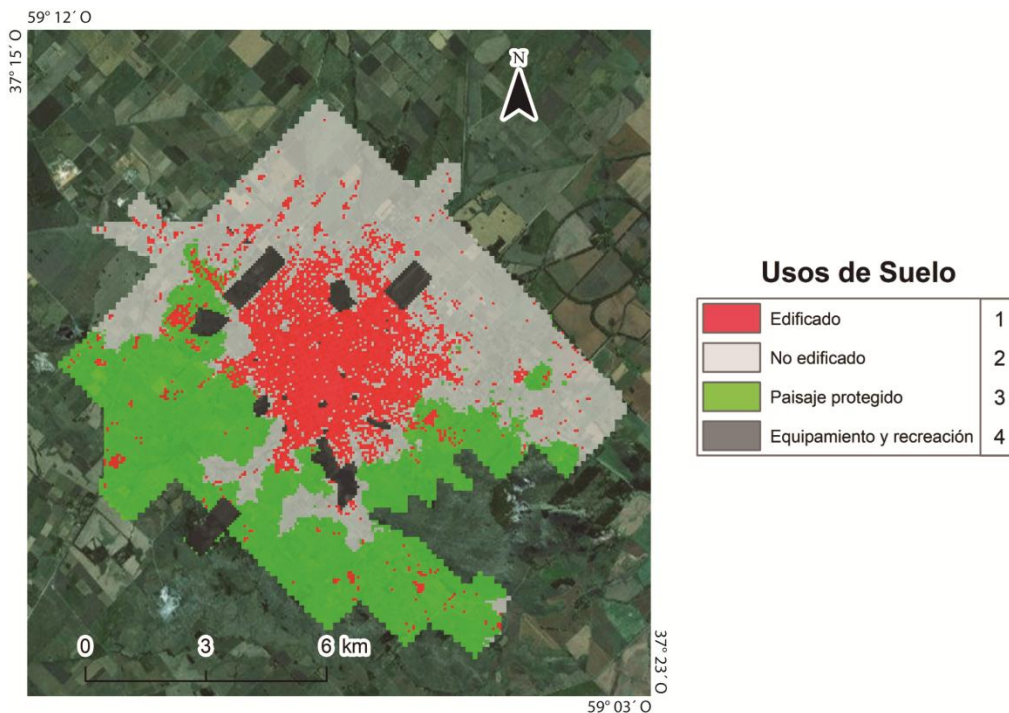


Figura 2. Mapa de usos de suelo codificado 2003

La segunda etapa, es la selección de los factores de crecimiento, en este caso son cuatro los seleccionados, pero se pueden incorporar tantos como se tenga información, incrementando la complejidad del análisis. Los factores utilizados fueron:

proximidad a áreas urbanas (a partir del mapa de área construida), proximidad a vías de comunicación (utilizando el mapa de calles de la ciudad), proximidad al área central o centralidad (se toma como punto la Plaza Independencia de la ciudad) y relieve llano o con poca pendiente (se utilizó un modelo digital de terreno generado a partir de la digitalización de curvas de nivel proveniente de las cartas topográficas del Instituto Geográfico Nacional, con el modelo se generó un mapa de pendientes). A partir de dicha selección se procede al cálculo de la distancia euclidiana de los píxeles a cada uno de los factores (Figura 3).

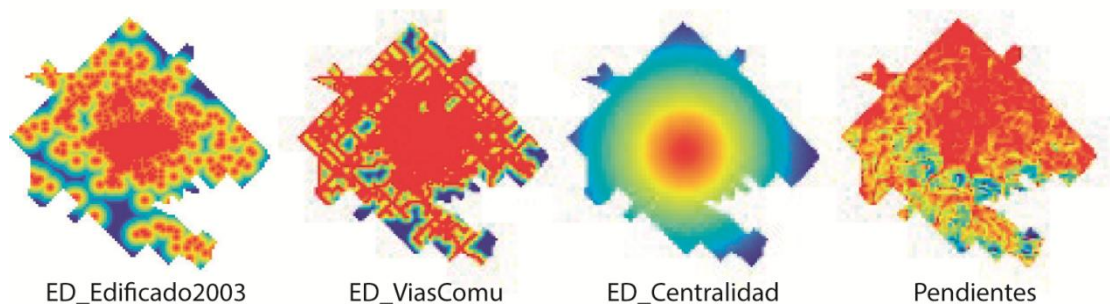


Figura 3. Distancia euclidiana a cada uno de los factores de cambio y valores de pendiente.

Para poder realizar una evaluación de cada uno de los factores, los mismos se deben estandarizar. Esto se logra a partir de un método lineal de ajuste difuso, con el cual se asume que la importancia de cada factor presenta un decrecimiento monótonico a medida que aumenta la distancia o la pendiente. De esta manera todos los factores van a variar entre 0 y 1, siendo los menores valores los que presentan mayor distancia o valor más alto de pendiente.

Con estos mapas resultantes se procede a la elaboración del mapa de Potencial de Transición Inicial (PTI) sobre la base que se simulará la expansión urbana. Este mapa es creado utilizando el método de Evaluación Multicriterio e implica la incorporación de ponderaciones individuales para cada uno de los factores seleccionados (Weighted Raster Module). En esta oportunidad se empleó la siguiente ponderación: distancia a área central 0,20; distancia edificado 0,30; distancia a vías de comunicación 0,3; y relieve llano o baja pendiente 0,20.

Para complementar el análisis del PTI y hacerlo compatible con el PDT de la ciudad de Tandil, se incorporaron los datos del Factor de Ocupación del Suelo (FOS) para la zonificación de la ciudad. A partir de la cual se puede distinguir aquellas zonas en las

cuales está prevista su densificación y aquellas que no. Este proceso se instrumenta en LanduseSim mediante una función denominada "TP with Zoning", la cual asigna ponderaciones según zonas al mapa de transición potencial inicial. Las ponderaciones oscilan entre 0.1 y 0.6 según el rango establecido de FOS para las distintas zonas de la ciudad de Tandil (Figura 4), indicando mayores probabilidades de edificación a medida que dicho factor aumenta. Como resultado de dicha operación se genera un nuevo PTI.

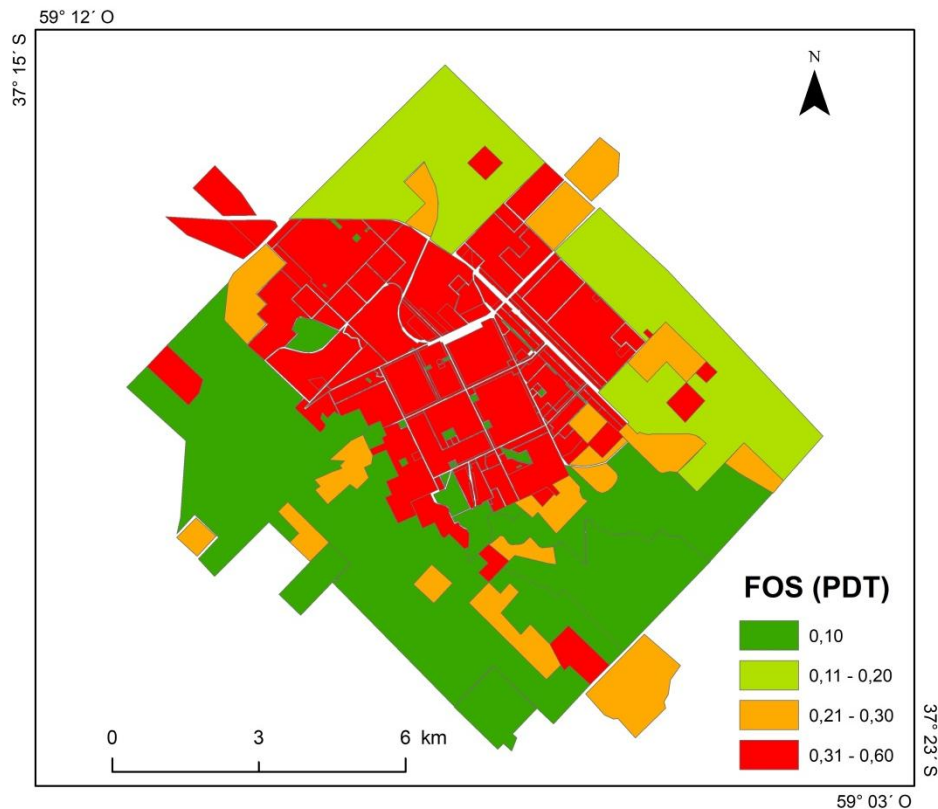


Figura 4. Mapa de FOS por zona del Plan de Desarrollo Territorial de la ciudad de Tandil.

Fuente: elaborado a partir de información del PDT (Municipio de Tandil, 2005).

En la tercera etapa, se debe definir la vecindad a partir de la cual se simulará el cambio de cada una de las celdas, o sea cuantos vecinos influirán en dicho cambio. En este caso se utilizó la vecindad de Moore radio 2 (5x5), aplicando la misma ponderación (1) a todas las celdas dentro del vecindario. Se definió la suma como la operación focal que realizará entre las celdas comprendidas dentro del vecindario. La

elección de suma o promedio indica un efecto colectivo de todos los vecinos sobre el uso del suelo en la celda central.

Una vez realizado el PTI y la vecindad, se determina la elasticidad de cambio entre usos de suelo, o sea la probabilidad de cambio de un uso a otro. A mayor valor de elasticidad el cambio es más factible que suceda. En este trabajo el único uso con posibilidades de crecimiento es el Edificado y el mismo puede cambiar sólo sobre el uso No edificado y Paisaje Protegido.

Por último, se elaboran las Reglas de Transición. Las mismas consisten en: el crecimiento esperado para la clase Edificado, el potencial de transición inicial para cada uso de suelo, los usos de suelo que no puede cambiar o son de uso restringido (Equipamiento y recreación) y la elasticidad de cambio de cada una de las categorías, en este caso sólo la correspondiente a Edificado.

Validación del modelo (2003-2011)

Siguiendo a Pontius et al. (2008), sólo se requiere de tres mapas para validar un modelo de cambios de usos del suelo: un mapa de referencia del tiempo 1 (2003), un mapa de referencia del tiempo 2 (2011 real) y un mapa de predicción del tiempo 2 (2011 simulado). La comparación entre el mapa de referencia del tiempo 2 y el mapa de predicción del tiempo 2 es el que mayoritariamente define la precisión de la predicción, y es el que a menudo se utiliza para validar la exactitud del modelo. A partir de ellos es posible calcular el desacuerdo de cantidad (es decir, comparar el cambio neto de píxeles por categorías) y el desacuerdo de ubicación (es decir, la correspondencia espacial entre lo predicho y la realidad).

La etapa de validación se realizó para un periodo de 8 años (2003-2011), en el cual se comparan los resultados obtenidos con datos reales provenientes de una clasificación supervisada realizada con una imagen de la misión Landsat sensor 5 TM con fecha 24/10/2011. A partir de los datos de referencia se obtuvo que durante el período analizado el cambio neto de la categoría Edificado aumento en 451 hectáreas. Esta misma tasa de cambio se aplicó durante el proceso simulación, por lo cual, no existen desacuerdos con respecto a esta medida de validación.

La Tabla 1 presenta los datos que permiten deducir las tres medidas relativas al desacuerdo por ubicación propuestas por Pontius et al. (2008): figura de merito, exactitud del usuario y exactitud del productor.

La figura de mérito es la relación entre la intersección del cambio observado y el

cambio previsto con la unión del cambio observado y el cambio previsto (1). La cifra de mérito puede variar desde el 0%, lo que significa que no hay superposición entre el cambio observado y el previsto, hasta el 100%, lo que significa un solapamiento perfecto entre el cambio observado y el predicho.

$$\text{Figura de mérito} = B / (A + B + C + D) \quad (1)$$

donde A es el área de error debido al cambio observado como persistencia, el área B correcta debido al cambio observado como cambio, el área C de error debido al cambio observado como categoría ganadora incorrecta y el área D de error debido a la persistencia observada predicho como cambio.

La ecuación (2) proporciona la precisión del productor, que es la proporción de píxeles que el modelo predice con precisión como cambio, dado que los mapas de referencia indican el cambio observado. La ecuación (3) proporciona la precisión del usuario, que es la proporción de píxeles que el modelo predice con precisión como cambio, dado que el modelo predice el cambio. La Tabla 1 expresa estas estadísticas como porcentajes.

$$\text{Exactitud usuario} = B / (A + B + C) \quad (2)$$

$$\text{Exactitud productor} = B / (B + C + D) \quad (3)$$

Tabla 1. Matriz de Confusión datos reales (Landsat 5 TM 2011) vs datos simulados (2011)

	Edificado	No edificado	Paisaje protegido	Equipamiento y recreación	Total
Edificado	3.190	1.032	255	0	4.477
No edificado	868	6.693	0	0	7.561
Paisaje protegido	466	0	6.596	0	7.062
Equipamiento y recreación	0	0	0	898	898
Total	4.524	7.725	6.851	898	19.998

Figura de mérito 87%

Exactitud productor 93%

Exactitud usuario 93%

Un análisis general de la Tabla 1 muestra que tanto los valores de merito como exactitud, son altos (por encima del 80 %), aunque se debe aclarar que este computo incluye toda la escena y no solamente las celdas con cambios. El análisis detallado muestra que los mayores errores se presentan en la confusión de áreas Edificadas con No Edificadas y en menor medida con el Paisaje Protegido. Se observa también al interpretar el mapa de aciertos y errores de los cambios pronosticados (Figura 5), que la expansión urbana en la realidad es mucho más dispersa que la simulada por el modelo, los errores se propagan en la periferia y los aciertos se distribuyen alrededor del área consolidada, esto puede deberse a la incorporación durante el proceso de calibración de los parámetros del FOS como restricción a la urbanización, por el contrario, el patrón general de expansión urbana no parece regirse por dicha norma urbanística.

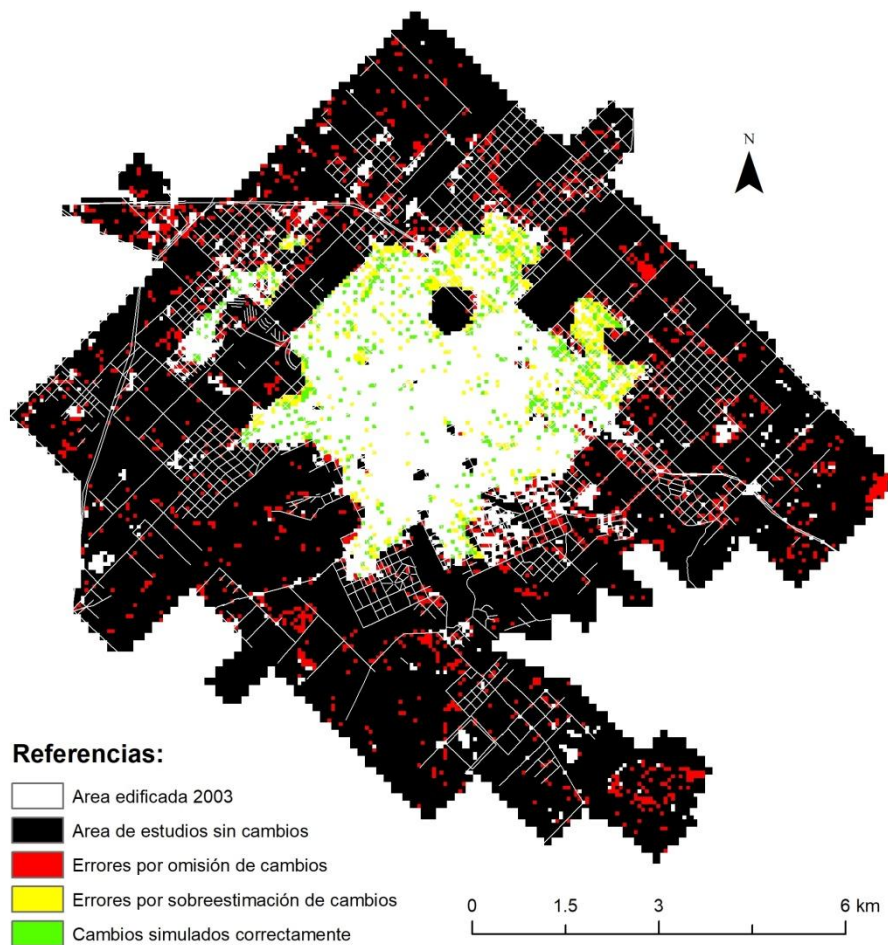


Figura 5. Mapa de validación de localización de los cambios simulados (2011).

Modelización proyectiva (2003-2033)

Finalmente, luego de obtener los resultados esperados en la validación se procede a la modelización proyectiva para el periodo de 30 años (2003 – 2033). Siguiendo la tasa de crecimiento obtenida para la validación, el total de crecimiento para el Edificado es de 1.692 hectáreas.

RESULTADOS

A partir de la simulación se puede realizar un análisis detallado de que usos cambian y sobre que usos se producen esos cambios, a partir de un reporte alfanumérico que realiza el LanduseSim. En este caso, los usos que era factible de cambio eran: No edificado y Paisaje Protegido, ambos hacia Edificado. Así al realizar el análisis comparado del año de inicio (2003) y el año de finalización de la simulación (2033) se observa que del total de cambios (1.632 ha), el 75% es resultado del reemplazo de áreas No Edificadas por Edificadas, mientras que el 25% (415 ha) restante del crecimiento se produce sobre el Paisaje Protegido (Tabla 2). Esas hectáreas significan el 11% de la superficie inicial de Paisaje Protegido presente en 2003. Esta pérdida, significaría una reducción de los servicios ecosistémicos que dicho uso brinda en el área de estudio. Particularmente se reduciría las tasas de infiltración, la capacidad de regulación térmica y la pérdida de biodiversidad de dichos espacios.

Tabla 2. Comparación de cambio o no cambios de uso de suelo (Ha)

Uso 2003	Uso 2033	Hectáreas
Edificado	Edificado	1.880
No Edificado	No Edificado	2.979
Paisaje Protegido	Paisaje Protegido	3.230
Equipamiento y Recreación	Equipamiento y Recreación	455
No Edificado	Edificado	1.217
Paisaje Protegido	Edificado	415

Además del análisis alfanumérico, se obtuvieron mapas que permiten visualizar cartográficamente el proceso de expansión urbana, sobre todo su distribución espacial. En la Figura 6 se muestra el proceso en cuatro cortes temporales con periodicidad decádica.

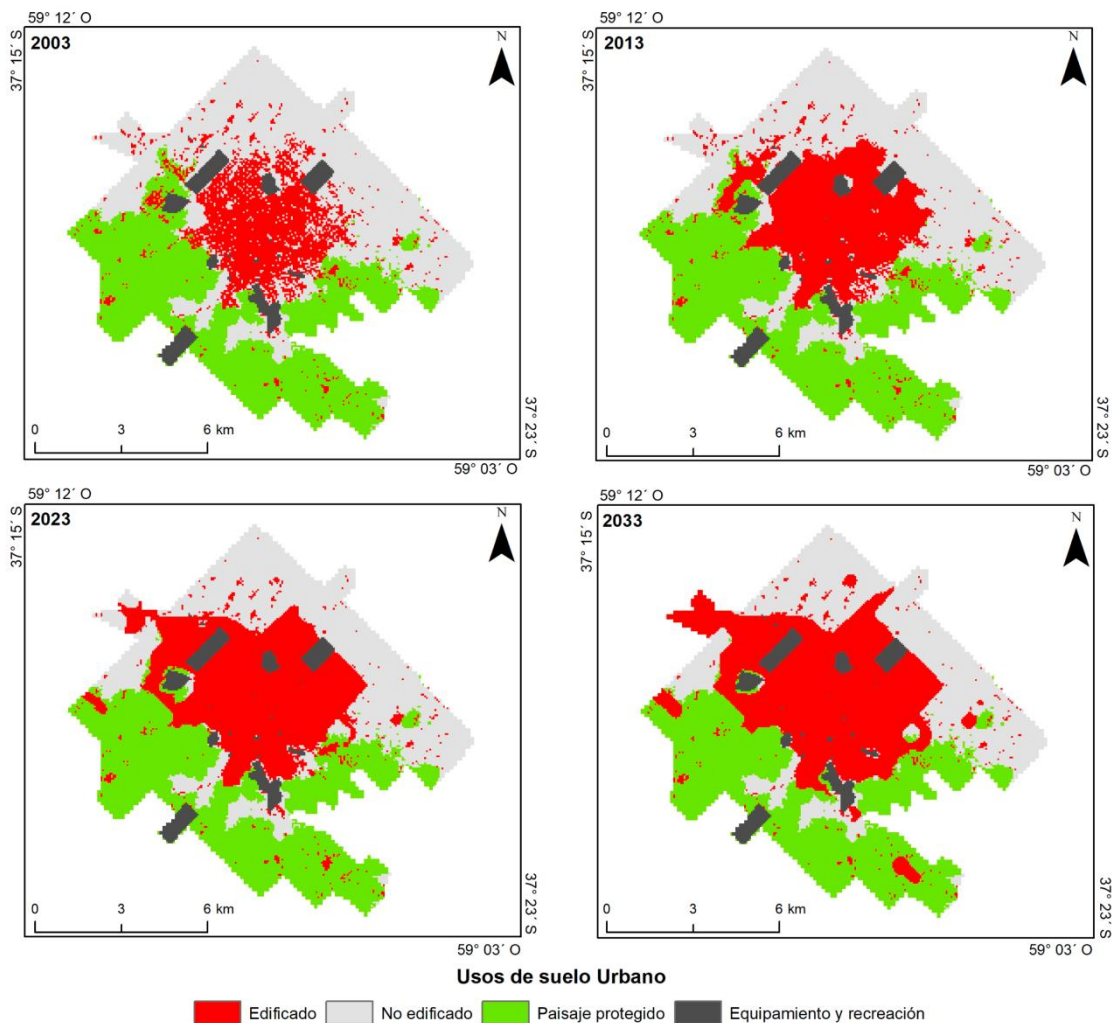


Figura 6. Evolución de los cambios de usos de suelo y el proceso de expansión urbana para la ciudad de Tandil (2003-2033) obtenido por simulación de autómatas celulares.

Al observar la Figura 6, se puede distinguir que el periodo de mayores cambios espaciales se produce entre 2013 y 2023 con una clara consolidación de la mancha edificada tanto sobre el centro norte de la imagen, como así también en el este de la misma, con la consolidación y unificaciones de espacios desconectados previamente. Por otro lado, el periodo 2023-2033 muestra una densificación de las construcciones

dispersas presentes en los periodos previos, sobre todo en sur y oeste de la imagen. Los patrones espaciales de crecimiento de la simulación muestran que hacia el este y el norte la mayor parte del cambio de uso a Edificado se hace sobre uso No Edificado. Por otro lado, el avance de la Edificación sobre el oeste y el sur se da sobre el Paisaje Protegido, reduciendo los servicios ecosistémicos previamente analizados.

El resultado coincide con los nuevos procesos de urbanización en otras ciudades medias argentinas, en donde los procesos de dispersión de nuevas áreas urbanas o sobre áreas de muy baja densidad predominan en detrimento de los procesos tradicionales de propagación y compactación (Buzai, 2014).

La pérdida de Paisaje Protegido, como resultado del crecimiento actual en la ciudad, puede tener grandes impactos en ambientales. Particularmente se hará referencia a los posibles efectos de éstos sobre la distribución espacial de la temperatura, el escurrimiento superficial del agua y sus impactos sobre la biodiversidad.

De acuerdo con estudios previos, en las últimas dos décadas la ciudad de Tandil ha sufrido cambios en la distribución espacial de la temperatura, relacionada esto al reemplazo de coberturas naturales (pastizal pampeano) por áreas construidas (Picone, 2014). Estos cambios se relacionan con la aparición de una isla de frío urbana durante la mañana y una intensificación de efectos de isla de calor durante la tarde y la noche, especialmente en primavera y verano. De corroborarse los cambios del modelado de crecimiento urbano en cual un 10 % de área de Paisaje Protegido es reemplazado por áreas construidas, las diferencias térmicas podrían verse afectada, pero no de manera alarmante ya que la característica térmica del sustrato rocoso del área es similar a las del área construida. La principal diferencia entre ambas coberturas reside en que las rocas están cubiertas de pastizal pampeano por lo que tienen un mayor efecto regulador. Esto supondría que dicho reemplazo podría aumentar de manera gradual las condiciones de discomfort térmico en el área.

El escurrimiento superficial en ciudades, según lo que plantea Weng (2001), debe ser estudiado en relación con la cobertura del suelo urbano, ya que los cambios en las características de las coberturas tienen impactos directos sobre el escurrimiento. Aumentando áreas impermeables, particularmente sobre el área de Paisaje Protegido, reduce la tasa infiltración de agua de lluvia aumentando la cantidad de agua que escurre superficialmente. Todo esto genera la necesidad de más infraestructura hidráulica que reduzca los peligros de inundación y anegamiento en el área de estudio.

Según trabajos sobre las condiciones actuales de escurrimiento, La Macchia (2015), el sistema ya muestra deficiencias, particularmente, en eventos extremos de lluvia. Actualmente el área de Paisaje Protegido, es una de las zonas con mayor capacidad de infiltración de agua de lluvia, por lo que su reemplazo con superficies impermeables podría aumentar el peligro de inundación y anegamiento del área de estudio.

En cuanto al análisis de la biodiversidad del área de Paisaje Protegido es central señalar que los sistemas serranos de la provincia de Buenos Aires son alguna de las escasas áreas que conservar el pastizal pampeano y su rica biodiversidad. Marquéz (2015) realizó un análisis de la invasión de especies exóticas en el área de estudio. Este proceso se presenta como una problemática ya que dichas especies compiten y ocupan hábitats con las especies autóctonas y endemismos que presentan una riqueza importante en cuanto a los servicios ecosistémicos que brindan. En dicho estudio quedo de manifiesto que el proceso de invasión está particularmente dinamizado por la creación de nuevos caminos. En caso de que el proceso de crecimiento urbano fuera el descrito en este trabajo, el proceso de las invasoras incrementaría su impacto y dispersaría la problemática aún más que lo que se observa actualmente.

Según el Plan de Desarrollo Territorial (Municipio de Tandil, 2005) se considera al "... cordón serrano del partido como una unidad de paisaje integral susceptible de preservar en sus valores geológicos, estético-paisajístico, hídricos, geomorfológicos, culturales e identitarios...". Es por ello central que se tome conciencia sobre los posibles efectos de la urbanización sobre el cordón serrano y sus consecuencias a mediano y largo plazo.

En el trabajo de Henríquez (2014), presenta un excelente ejemplo de cómo relacionar los resultados de las simulaciones a futuro y las consecuencias ambientales que se pueden generar. Dicho trabajo presenta principalmente el aumento de la intensidad de la isla de calor, la estimación de escorrentía superficial y la pérdida de suelo agrícola, para dos ciudades medias chilenas. Este tipo de trabajo es el que se espera realizar a partir de lo analizado hasta el momento en la ciudad de Tandil.

CONCLUSIONES

En cuanto a los resultados en este trabajo, cabe destacar que el modelo presentado tiene un muy buen ajuste con que ha sucedido en la realidad. La validación del mismo supero el 80% de las medidas de exactitud, a pesar de ellos se podría mejorar el ajuste de la densificación del área central para replicar las características de dispersión que presenta la ciudad de Tandil.

En cuanto al análisis de los resultados obtenidos con respecto a la pérdida de Paisaje Protegido, se debe destacar que, de seguir con este modelo de expansión urbana, más de una 10% de dicho paisaje se vería afectado de manera irreversible y muy probablemente si se consideran las áreas de contacto ese porcentaje sería mayor. Dicho efecto se manifiesta en la reducción de servicios ecológicos que este tipo de crecimiento generaría generando implicancias no sólo en el área serrana sino también en la ciudad, ya que la impermeabilización de las sierras significaría mayor escorrentía superficial que sería desagotada en la ciudad, por cuestiones del funcionamiento del sistema de drenaje natural. Por otro lado, la pérdida de vegetación aumentaría la amplitud térmica del área, aunque este efecto es menor debido a las características térmica del material rocoso que conforma el área, muy similar a las coberturas urbanas. Por último, la reducción de la biodiversidad característica del sistema serrano tendría un gran impacto por la invasión de especies exóticas, particularmente teniendo en cuenta que estos espacios son uno de los relictos donde se conserva el pastizal pampeano.

El modelo LanduseSim ha demostrado ser muy dúctil para su implementación, solo requiere de una única escena de uso del suelo (con capacidad de hasta 40 usos) para su calibración y ejecución y habilita la inclusión de una quincena de factores explicativos, lo cual consideramos suficientes para la generación de escenarios. Además de ello, la capacidad de intercambio entre formatos y estandarización de archivos garantiza un uso de este modelo independientemente del software empleado para la elaboración de los insumos. Durante el proceso de calibración, se generan varios mapas con uso potencial en otros análisis dentro del área de estudio, como los mapas estandarizados de factores y el mapa inicial de transición potencial. Asimismo, la flexibilidad para incorporar vecindarios adaptativos y elasticidades de cambios entre usos, resultan ser de suma utilidad para replicar simulaciones en múltiples contextos. Dentro de las debilidades del modelo podríamos mencionar que el método de

ponderación durante la evaluación multicriterio de los factores es extremadamente dependiente de la subjetividad del modelador, debido a que no dispone de un módulo de calibración automática que establezca la correlación entre factores y usos, también adolece de un módulo para generar cartografía dinámica lo cual ampliaría la capacidad y posibilidad de interpretación de los resultados. Finalmente, no posee un proceso integrado de validación que impide poder conocer la bondad del modelo, sino es por fuera de este software.

De manera general es muy importante destacar la potencialidad de la herramienta de modelización. En este trabajo sólo se presenta una primera aproximación a lo que puede aportar al análisis de los efectos ambientales que se podrían producir por una tendencia en los cambios de uso de suelo urbano. En cuanto a otras alternativas de uso de la herramienta sería interesante explorar un modelo normativo en el cual se centrará el énfasis en generar una mayor sustentabilidad de los resultados, reduciendo la pérdida de paisaje protegido, por ejemplo, restringiendo su cambio. Por otro lado, generar un modelo exploratorio de cuáles serían los resultados si ocurriese lo contrario y se generaran crecimientos urbanos que avanzaran aún más sobre el área serrana, podría plantear el peor escenario posible. También queda por avanzar en el estudio de mayor complejidad en cuanto a las consecuencias ambientales de distintos modelos de cambios de usos de suelo.

BIBLIOGRAFÍA

- Arsanjani, J. J., Helbich, M., Kainz, W., & Boloorani, A. D. (2013). Integration of logistic regression, Markov chain and cellular automata models to simulate urban expansion. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 265-275.
- Batty, M., Xie, Y., & Sun, Z. (1999). Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata. *Computers, environment and urban systems*, 23(3), 205-233.
- Berberoglu, S., Akın, A., & Clarke, K. C. (2016). Cellular automata modeling approaches to forecast urban growth for adana, Turkey: A comparative approach. *Landscape and Urban Planning*, 153, 11-27.
- Buzai, G. (2014). Mapas Sociales Urbanos. Segunda Edición. Lugar Editorial.
- Clarke, K. C. (2014) Why simulate cities? *GeoJournal* 79:129–136.

- Clarke, K. C., Hoppen, S., & Gaydos, L. (1997). A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and planning B: Planning and design*, 24(2), 247-261.
- Fernández Equiza, A. (2017) El crecimiento de la ciudad de Tandil, actores y conflictos. Fernández Equiza (Ed.) *Debates sobre desarrollo y naturaleza*. Tandil, Argentina. 235-277.
- Henríquez, C. (2014). *Modelando el crecimiento de ciudades medias: hacia un desarrollo urbano sustentable*. Ediciones UC.
- Kumar, D. S., Arya, D. S., & Vojinovic, Z. (2013). Modeling of urban growth dynamics and its impact on surface runoff characteristics. *Computers, Environment and Urban Systems*, 41, 124-135.
- La Macchia, L. (2015). *Modelización y análisis espacial del drenaje urbano de la ciudad de Tandil mediante tecnologías de la información geográfica*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.
- Lambin, E. F., & Geist, H. J. (Eds.). (2008). *Land-use and land-cover change: local processes and global impacts*. Springer Science & Business Media.
- Lu, K. S., Allen, J. S., Liu, G., & Wang, X. (2015). Assessing Impacts of Urban Expansion on Coastal Ecosystems Based on Different Growth Scenarios. *Papers in Applied Geography*, 1(2), 143-151.
- Lu, Q., Chang, N. B., Joyce, J., Chen, A. S., Savic, D. A., Djordjevic, S., & Fu, G. (2017). Exploring the potential climate change impact on urban growth in London by a cellular automata-based Markov chain model. *Computers, Environment and Urban Systems*.
- Lu, Q., Joyce, J., Imen, S., & Chang, N. B. (2017). Linking socioeconomic development, sea level rise, and climate change impacts on urban growth in New York City with a fuzzy cellular automata-based Markov chain model. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2399808317720797.
- Márquez, M. I. (2015) *Leñosas exóticas invasoras en el área del Paisaje Protegido en las Sierras de Tandil. Diagnóstico y Pautas de gestión*. Tesis de Licenciatura.

- Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.
- Moghadam, H. S., & Helbich, M. (2013). Spatiotemporal urbanization processes in the megacity of Mumbai, India: A Markov chains-cellular automata urban growth model. *Applied Geography*, 40, 140-149.
- Municipalidad de Tandil (2005) Plan de Desarrollo Territorial del Municipio de Tandil. Tandil, Argentina.
- Pérez-Molina, E., Sliuzas, R., Flacke, J., & Jetten, V. (2017). Developing a cellular automata model of urban growth to inform spatial policy for flood mitigation: A case study in Kampala, Uganda. *Computers, Environment and Urban Systems*, 65, 53-65.
- Picone, N. (2014). *Clima urbano de la ciudad de Tandil*. Tesis Doctoral. Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur.
- Picone, N. y Linares, S. 2014. Propuesta metodológica para la extracción y el análisis de densidades urbanas mediante teledetección y SIG. Caso de estudio: ciudad de Tandil, Argentina. *Revista Universitaria de Geografía*. 23 (2): 77 – 96.
- Polidori, M. C. (2007). Simulação de crescimento urbano e sustentabilidade. In *XI Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica-XI CONFIBSIG*. Buenos Aires: Sociedad Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica (SIBSIG) y Universidad Nacional de Luján (UNLu).
- Pontius Jr., R.G., Boersma, W., Castella, J.-C., Clarke, K., de Nijs, T., Dietzel, C., Duan, Z., Fotsing, E., Goldstein, N., Kok, K., Koomen, E., Lippitt, C.D., McConnell, W., Mohd Sood, A., Pijanowski, B., Pithadia, S., Sweeney, S., Trung, T.N., Veldkamp, A.T., Verburg, P.H., (2008). Comparing input, output, and validation maps for several models of land change. *Ann. Reg. Sci.* 42 (1), 11-47.
- Pratomoatmojo N. A. (2016). LanduseSim Practice: spatial modeling of settlement and industrial growth by means of cellular automata and Geographic Information System. Urban and Regional Planning Department, Sepuluh Nopember Institute of Technology, Surabaya. Disponible en: <http://www.landusesim.com/>
- Randolph, J. (2004). Environmental land use planning and management. Island Press.
- Santé, I., García, A. M., Miranda, D., & Crecente, R. (2010). Cellular automata models

for the simulation of real-world urban processes: A review and analysis. *Landscape and Urban Planning*, 96(2), 108-122.

Veldkamp, A., & Verburg, P. H. (2004). Modelling land use change and environmental impact. *Journal of Environmental Management*, 72(1), 1-3.

Weng, Q. (2001). Modelling urban growth effects on surface runoff with the integration of remote sensing and GIS. *Environmental Management*. 28 (6). pp. 737-748

White, R. (1998). Cities and cellular automata. *Discrete dynamics in Nature and Society*, 2(2), 111-125.

White, R., & Engelen, G. (1993). Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns. *Environment and planning A*, 25(8), 1175-1199.