



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



EL EMPLEO DE AUTÓMATAS CELULARES Y SU APLICACIÓN EN PROBLEMAS DE INGENIERÍA

Trabajo realizado por:
Lucía Fernández Gutiérrez

Dirigido:
Saúl Torres Ortega
Pedro Díaz Simal

Titulación:
**Máster Universitario en
Ingeniería de Caminos, Canales y
Puertos**

Santander, septiembre de 2022

TRABAJO FIN DE MASTER

RESUMEN

Título: El empleo de autómatas celulares y su aplicación en problemas de ingeniería.

Autora: Lucía Fernández Gutiérrez.

Director: Saúl Torres Ortega, Pedro Díaz Simal.

Titulación: Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.

Convocatoria: Santander, septiembre 2022.

Palabras clave: autómata celular, modelo, sistema, desarrollo urbano, crecimiento urbano, problema, aplicación, ingeniería.

El constante movimiento de los seres humanos hace que las ciudades, especialmente las grandes ciudades y capitales, estén en continuo desarrollo y crecimiento. Las oportunidades laborales que se dan en las grandes ciudades, así como la amplia oferta de educación, servicios y ocio hace que mucha gente, especialmente la población joven, se mude a estas ciudades. Además, el aumento de la esperanza de vida hace que el aumento de población en estas ciudades sea aún mayor. Debido a esto, estas ciudades están en continua expansión, tanto de viviendas como de servicios e infraestructuras que son necesarios. Es decir, las ciudades crecen continuamente. Y es muy importante planificar y prever estas expansiones, ya que si no se controlan pueden descontrolarse y crearse zonas con gran diferencia respecto a otras. Además, mediante la previsión se puede garantizar la calidad de vida de todos los ciudadanos y su acceso y buenas conexiones a servicios públicos.

Gracias al avance de las tecnologías, especialmente los programas de análisis y visualización de datos, podemos modelar una ciudad y gracias al análisis de distintos datos podemos analizar, en base a decisiones y movimientos históricos de la población, como van a evolucionar las zonas urbanas, incluso se pueden llegar a plantear escenarios futuros “what if” y estudiar como respondería una ciudad a distintas decisiones, como puede ser un Plan General de Urbanización o la modificación de una red de transporte.

Dentro de todos los posibles modelos que existen, aquellos que se basan en autómatas celulares son de los más usados en la modelización de zonas urbanas. Son capaces de simular el desarrollo urbano a lo largo del espacio y tiempo y se pueden usar para visualizar varios escenarios “what if”.

El empleo de estos modelos proporciona una serie de herramientas y datos muy útiles en el análisis de la expansión de las zonas urbanas, especialmente las grandes ciudades. Aunque los países desarrollados ya vivieron la expansión y crecimiento de sus principales ciudades en el siglo pasado, los países en vías de desarrollo están viviendo este proceso. El análisis de las tendencias de una población permite prever de forma probabilística como esa misma población va a responder a una serie de cambios o normativas.



Los autómatas celulares tienen unas características que hacen que sean idóneos para este tipo de modelizaciones, como el efecto del vecindario, ya que el espacio que rodea un área influye muy fuertemente en su desarrollo. No es lo mismo hacer una nueva área residencial al lado de otra zona similar que de una zona industrial. Las reglas de transición y su personalización permiten poder modelar y analizar los escenarios que queramos, ya que podríamos hacer que las celdas evolucionen únicamente en función de los factores que nos interesen.

La incorporación y facilidad de acoplamiento de otros programas permiten un análisis de datos mucho más efectivo. Por ejemplo, su acoplamiento a programas GIS permite analizar, visualizar y exportar datos ráster de una manera rápida y precisa.

Desde el punto de vista de la Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, los modelos de autómatas celulares son herramientas muy potentes para permitir el desarrollo adecuado de las zonas urbanas. No sólo por tener la posibilidad de analizar la expansión de una ciudad en un periodo determinado, si no por el análisis de posibles escenarios y ver como afectarían o como respondería la población. Es decir, gracias a estos modelos se puede prever la construcción o adecuación de infraestructuras, la ampliación o modificación de las redes de transporte y muchas más actuaciones. Estos modelos permiten un desarrollo controlado y que sea posible una expansión sin que los habitantes pierdan calidad de vida.



ABSTRACT

Title: The use of cellular automaton and its application in engineering problems.

Author: Lucía Fernández Gutiérrez.

Director: Saúl Torres Ortega, Pedro Díaz Simal.

Academic Title: Master's Degree in Civil Engineering, Canal and Port Engineering.

Date: Santander, september 2022.

Key words: cellular automaton, model, system, urban development, urban growth, problem, application, engineering.

The constant movement of human beings means that cities, especially large cities and capitals, are in continuous development and growth. The job opportunities that exist in large cities, as well as the wide range of education, services and leisure, make many people, especially the young population, move to these cities. In addition, the increase in life expectancy makes the population increase in these cities even greater. Due to this, these cities are constantly expanding, both in housing and in services and infrastructure that are necessary. That is, cities are continually growing. And it is very important to plan and anticipate these expansions, because if they are not controlled they can get out of control and create areas with a great difference compared to others. In addition, through forecasting, the quality of life of all citizens and their access and good connections to public services can be guaranteed.

Thanks to the advancement of technologies, especially data analysis and visualization programs, we can model a city and thanks to the analysis of different data we can analyze, based on decisions and historical movements of the population, how urban areas are going to evolve, it is even possible to propose future "what if" scenarios and study how a city would respond to different decisions, such as a General Urbanization Plan or the modification of a transport network.

Among all the possible models that exist, those that are based on cellular automaton are the most used in the modeling of urban areas. They are capable of simulating urban development over space and time and can be used to visualize various "what if" scenarios.

The use of these models provides a series of very useful tools and data in the analysis of the expansion of urban areas, especially large cities. Although developed countries have already experienced the expansion and growth of their main cities in the last century, developing countries are experiencing this process. The analysis of the trends of a population allows probabilistic forecasting of how that same population will respond to a series of changes or regulations.

Cellular automaton have characteristics that make them suitable for this type of modeling, such as the neighborhood effect, since the space surrounding an area strongly influences its development. Building a new residential area next to another similar area is not the same as building an industrial area. The transition rules and their customization



LUCÍA FERNÁNDEZ GUTIÉRREZ

allow us to model and analyze the scenarios we want, since we could make the cells evolve only based on the factors that interest us.

The incorporation and ease of coupling of other programs allow a much more effective data analysis. For example, its coupling to GIS programs allows you to analyze, visualize and export raster data quickly and accurately.

From the point of view of the Engineering of Roads, Canals and Ports, the cellular automaton models are very powerful tools to allow the proper development of urban areas. Not only for having the possibility of analyzing the expansion of a city in a given period, but also for the analysis of possible scenarios and seeing how they would affect or how the population would respond. In other words, thanks to these models, it is possible to foresee the construction or adaptation of infrastructures, the expansion or modification of transport networks and many more actions. These models allow for controlled development and expansion without the inhabitants losing quality of life.

Índice

1.	Introducción	3
2.	Los modelos y el proceso de modelización urbana	8
2.1	Modelización del desarrollo urbano.....	8
2.2	Tipos de modelos.	9
2.3	Proceso de modelado.....	11
2.4	Enfoques teóricos en la modelización del desarrollo urbano.	12
2.5	Prácticas actuales en la modelización del desarrollo urbano.	13
2.5.1	Conjunto y lógica difusos.....	13
2.5.2	GIS y la modelización urbana.	13
3.	Autómatas celulares.....	14
3.1	Modelos y autómatas celulares.....	14
3.2	¿Qué es un autómata celular?	14
3.2.1	El Juego de la Vida.....	15
3.2.2	Autómata celular elementario.....	16
3.2.3	Elementos básicos de un autómata celular.....	17
3.2.4	Características complejas de un autómata celular.	17
3.3	El uso de autómatas celulares en la modelización urbana.....	18
3.4	Modelización urbana basada en autómatas celulares.....	23
3.5	Modelos basados en autómatas celulares	28
3.5.1	Barredo et al. y el modelo de Dublín, Irlanda (2003).....	28
3.5.1.1	Introducción al modelo.....	28
3.5.1.2	El método de análisis.....	29
3.5.1.3	Resultados.....	31
3.5.1.4	Conclusiones.....	33
3.5.2	White y Engelen y el modelo LeefOmgevingsVerkenner (2000)	34
3.5.2.1	Introducción al modelo.....	34
3.5.2.2	El modelo de autómatas celulares.....	34
3.5.2.3	El modelo regional vinculado.....	35
3.5.2.4	Resultados.....	36
3.5.2.5	Conclusiones.....	36
3.5.3	Feng et al. y el modelo Songjiang, China (2016).	36
3.5.3.1	Introducción al modelo.....	36
3.5.3.2	El modelo.	37
3.5.3.3	Resultados.....	38
3.5.3.4	Conclusiones.....	39
3.5.4	Barredo y Demicheli y el modelo de Lagos, Nigeria (2003).....	39
3.5.4.1	Introducción al modelo.....	39
3.5.4.2	El modelo.	40
3.5.4.3	Resultados.....	42
3.5.4.4	Conclusiones.....	43
3.5.5	Liu y el modelo de Sídney (2009).....	43
3.5.5.1	Introducción al modelo.....	43



3.5.5.2	El modelo.	44
3.5.5.3	Resultados.	45
3.5.5.4	Conclusiones.	47
4.	Aplicación	52
4.1	Hewitt, Díaz Pacheco y Moya Gómez y el modelo Simlander (2013)	52
4.2	Aplicación del modelo.	52
4.3	Resultados del modelo.	56
5.	Conclusiones	63
	Bibliografía	65
	Anexo 1	67

1. Introducción

El constante movimiento de los seres humanos hace que las ciudades, especialmente las grandes ciudades y capitales, estén en continuo desarrollo y crecimiento. Las oportunidades laborales que se dan en las grandes ciudades, así como la amplia oferta de educación, servicios y ocio hace que mucha gente, especialmente la población joven, se mude a estas ciudades. Además, el aumento de la esperanza de vida hace que el aumento de población en estas ciudades sea aún mayor. Debido a esto, estas ciudades están en continua expansión, tanto de viviendas como de servicios e infraestructuras que son necesarios. Un ejemplo claro de esto lo podemos encontrar en Madrid, que actualmente está afrontando el plan de expansión llamado Madrid Nuevo Norte, el cuál comprende la creación en la zona norte de la ciudad de más de 10.000 viviendas, con las infraestructuras que estas necesitan (urbanización, drenaje, líneas de transporte, etc.). Como complemento a esto, también se están ejecutando obras en el llamado Nudo Norte para disminuir el tráfico y mejorar la conexión con esta nueva zona de la ciudad. Simultáneamente a estas actuaciones, en la misma zona y bajo el mismo proyecto global, se está realizando la ampliación de la Estación de Madrid – Chamartín – Clara Campoamor.

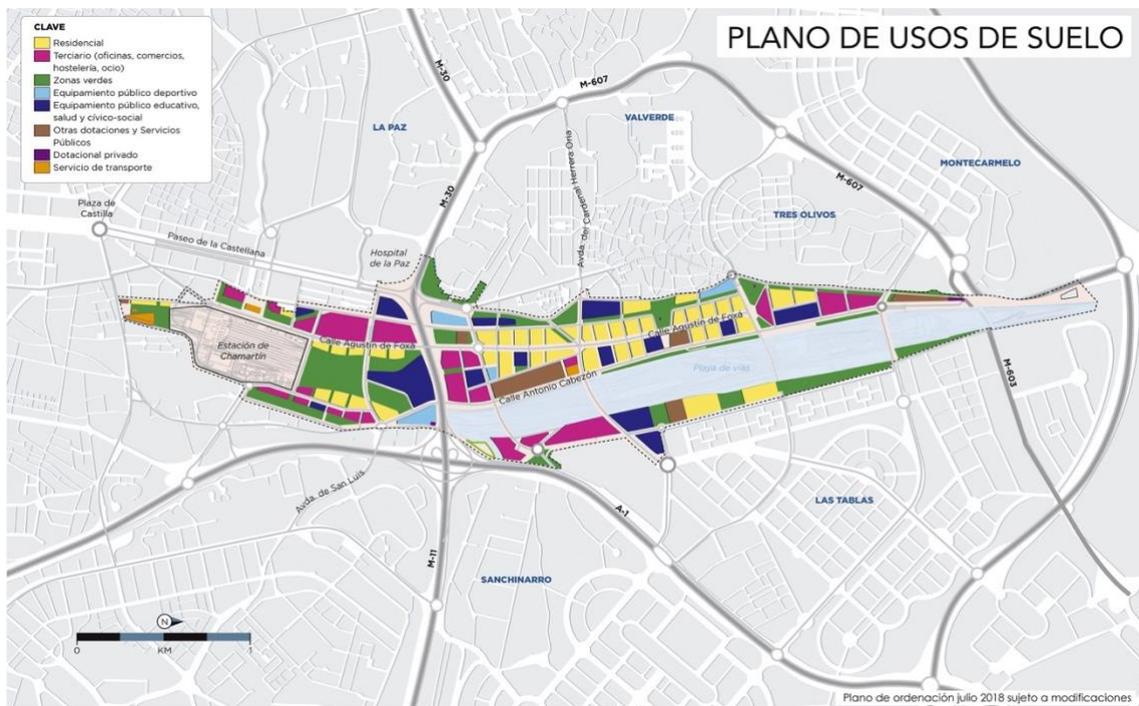


Figura 1.1 Usos del suelo en el entorno de Chamartín tras la realización de Madrid Nuevo Norte.

Es decir, las ciudades crecen continuamente. Y es muy importante planificar y prever estas expansiones, ya que si no se controlan pueden descontrolarse y crearse zonas con gran diferencia respecto a otras. Además, mediante la



tendencias de una población permite prever de forma probabilística como esa misma población va a responder a una serie de cambios o normativas.

Los autómatas celulares tienen unas características que hacen que sean idóneos para este tipo de modelizaciones, como el efecto del vecindario, ya que el espacio que rodea un área influye muy fuertemente en su desarrollo. No es lo mismo hacer una nueva área residencial al lado de otra zona similar que de una zona industrial. Las reglas de transición y su personalización permiten poder modelar y analizar los escenarios que queramos, ya que podríamos hacer que las celdas evolucionen únicamente en función de los factores que nos interesen.

La incorporación y facilidad de acoplamiento de otros programas permiten un análisis de datos mucho más efectivo. Por ejemplo, su acoplamiento a programas GIS permite analizar, visualizar y exportar datos ráster de una manera rápida y precisa.

Existen varios proyectos de análisis del desarrollo urbano mediante modelos basados en autómatas celulares, los cuales incorporan, casi todos, las herramientas GIS. La mayoría de los estudios concluyen en que estos modelos son herramientas muy potentes y útiles para poder prever el futuro y analizar que decisiones son mejores para el crecimiento de un área urbana. Coinciden en que uno de los mejores métodos de calibración es mediante el análisis histórico, es decir, simular un periodo de tiempo del que tenemos datos y, en función de su similitud con los datos reales, ir calibrando el modelo.

Aunque hay que tener en cuenta que las previsiones de estos modelos son siempre en base a decisiones pasadas, es decir, son resultados en función de datos históricos. Por lo que no podemos fiarnos ni asegurar al cien por cien que las previsiones o simulaciones mostradas por estos modelos sean lo que va a ocurrir en el próximo periodo. Debido a esto, la mayoría de los modelos se basan en enfoques probabilísticos y analizan las tendencias históricas de la población de la zona.

Desde el punto de vista de la Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, los modelos de autómatas celulares son herramientas muy potentes para permitir el desarrollo adecuado de las zonas urbanas. No sólo por tener la posibilidad de analizar la expansión de una ciudad en un periodo determinado, si no por el análisis de posibles escenarios y ver como afectarían o como respondería la población. Es decir, gracias a estos modelos se puede prever la construcción o adecuación de infraestructuras, la ampliación o modificación de las redes de transporte y muchas más actuaciones. Estos

modelos permiten un desarrollo controlado y que sea posible una expansión sin que los habitantes pierdan calidad de vida.

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Máster es el estudio de una posible aplicación de autómatas celulares para predecir el desarrollo urbano en Cantabria. En Cantabria se ha producido un aumento de población en los últimos años, según datos del INE, en el año 2006 en esta comunidad autónoma había 564.188 habitantes, mientras que, en el 2021 se encontraban censados 584.407 habitantes. Este aumento de población supone mayor superficie de suelo urbano, mayores infraestructuras, superficies verdes, etc. El objetivo de este Trabajo consiste en estudiar la aplicación de un sistema de autómatas celulares para prever el desarrollo urbano de forma que, a medida que crecen las zonas urbanas, lo hagan los servicios e infraestructuras y se pueda tomar las medidas oportunas para garantizar un buen crecimiento urbanístico.



Figura 1.3 Arriba, Santander en 2006. Abajo, Santander en 2022. El desarrollo urbano es visible.



Como objetivos secundarios se plantea estudiar el modelado de sistemas y el estudio de los autómatas celulares. Así comprender como se modela un sistema y poder entender sus ventajas y desventajas, procesos y poder realizar la aplicación de uno de estos sistemas, como son los autómatas celulares, a una zona de interés.



2. Los modelos y el proceso de modelización urbana.

2.1 Modelización del desarrollo urbano.

El desarrollo urbano y la migración de la población son fenómenos muy significativos además de ser globales, ya que los patrones de crecimiento urbano de los países en desarrollo no difieren mucho del crecimiento que se produjo en Europa y Norteamérica el siglo pasado.

Cuando se produce un desarrollo urbano rápido, normalmente es a expensas de buenos terrenos agrícolas, con la consecuente destrucción de paisajes naturales y espacios abiertos. El proceso espaciotemporal del desarrollo urbano y las consecuencias socioambientales son objeto de varios estudios por parte de geógrafos urbanos, planificadores y políticos, ya que tienen un gran directo impacto sobre los seres humanos.

La RAE define modelo como “esquema teórico, generalmente en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja, como la evolución económica de un país, que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento” (*Real Academia Española*, 2022). El diccionario Webster lo define como “descripción o analogía usada para ayudar a visualizar algo (como un átomo) que no puede ser observado directamente” (*Merriam-Webster*, 2022). A su vez, el diccionario Collins ofrece la siguiente definición “representación simplificada de un sistema o entidad compleja, especialmente una diseñada para facilitar cálculos y predicciones” (*Collins English Dictionary*, 2022). Es decir, podemos afirmar que un modelo es una representación simplificada de la realidad. Por lo tanto, el modelado o modelización es el proceso o comportamiento de producir modelos.

Prácticamente, todos los sistemas que simulan el mundo real son extremadamente complejos. Por eso, con el uso de modelos estos sistemas tan complicados pueden ser simplificados para poder entenderlos y manejarlos.

En los estudios científicos se distinguen modelos de teorías. Los modelos no sólo sirven como espacio de trabajo para expresar las teorías en un lenguaje preciso, sino que permiten a estas o las hipótesis que contienen ser examinadas. Los modelos también son importantes en el contexto práctico, sobre todo cuando se tratan sistemas sociales, muy habituales en el análisis y desarrollo urbano. Gracias a los modelos, se puede representar una estructura o función de un sistema real y entender, explicar o predecir el comportamiento del sistema. Los modelos permiten crear, además, ambientes artificiales para experimentar.



Como hemos comentado, los modelos son estructuras simplificadas de la realidad, por lo que no incluyen todos los detalles y medidas del sistema que están replicando. Una de las características fundamentales de los modelos es que tienen una actitud muy selectiva respecto a la información. Es decir, los modelos son representaciones selectivas de los sistemas del mundo real.

Esta característica implica que los modelos se parecen al mundo real en algún aspecto, son estructuras aproximadas de la realidad. Un buen modelo debe ser lo suficientemente simple para que una persona pueda entenderlo fácilmente y tomar decisiones usándolo. Debe ser adecuado para poder contener todos los elementos importantes del mundo real y debe ser válido, ya que todos estos elementos modelados deben estar interrelacionados de acuerdo con sus conexiones o estructuras.

Como los modelos son generados a partir de la realidad, representando sus características, deberían ser aplicados en el mundo real. Esto implica que un modelo que se genera de un sistema debería poder ser aplicado en otro sistema con características similares.

2.2 Tipos de modelos.

Los modelos se pueden clasificar de varias formas. De una forma muy general, pueden clasificarse según su grado de simplificación y abstracción. (*Thomas & Huggett, 1980*).

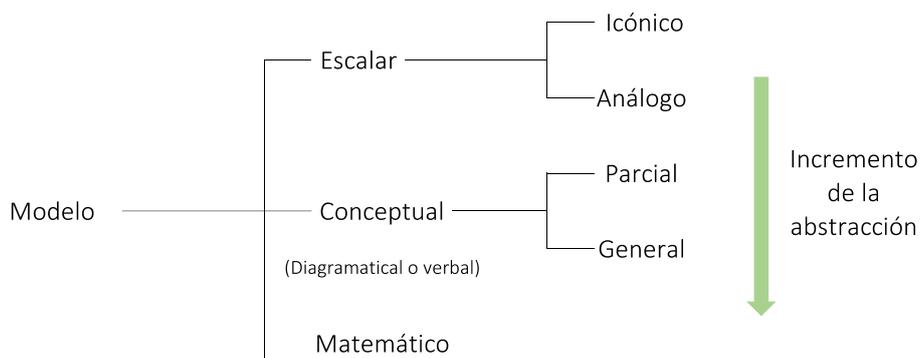


Figura 2.1 Tipos de modelos.

El nivel más simple de abstracción ocurre cuando la realidad únicamente es alterada en términos de escala. Los modelos escalares pueden ser diferenciados en icónicos, si son una copia en miniatura de la realidad, o análogos, cuando la miniatura es acompañada de la transformación de alguna propiedad.



El siguiente nivel son los modelos conceptuales, los cuales se focalizan en las relaciones entre los distintos componentes de la realidad. Estos modelos pueden expresarse de forma diagramática o de forma verbal.

La mayor forma de abstracción se da en los modelos matemáticos, usados principalmente para estudios científicos. Y los modelos de esta categoría se pueden dividir en diferentes subclases.

En la siguiente tabla se hace un resumen de las clasificaciones más frecuentes de los modelos usados en la modelización del desarrollo urbano (*Liu, 2009*).

Criterios de clasificación	Tipo de modelos	Explicación del criterio de clasificación
Modelos de base teórica	Modelos basados en teorías	Los modelos derivan directamente de una teoría como una declaración simbólica de la teoría.
	Modelos cargados de teorías	Los fenómenos del mundo real se abstraen a formas simbólicas y se relacionan estructuralmente en un modelo para crear una nueva teoría.
Cuestiones de fondo que se están modelando	Modelos parciales	Los modelos solo tratan o una parte del sistema que es modelado o un subsistema de la realidad.
	Modelos generales	Los modelos tratan de hacer frente a dos o más subsistemas de la realidad modelada.
Características descriptivas o normativas de modelos	Modelos descriptivos	Los modelos descriptivos utilizan descripciones estéticas de la realidad.
	Modelos normativos	Los modelos normativos usan lo que podría esperarse que ocurriera bajo unas condiciones dadas.
La forma en la que los modelos tratan el tiempo	Modelos estáticos	Los modelos se centran en las características estructurales de equilibrio.
	Modelos dinámicos	Los modelos se concentran en los procesos y funciones a lo largo del tiempo.
La naturaleza predictiva de los modelos	Modelos determinísticos	Los modelos se basan en predicciones exactas, las cuales se reproducen a partir de las leyes naturales y físicas.
	Modelos estocásticos	También se llaman modelos probabilísticos, utilizan probabilidades y dan como resultado varios resultados posibles en lugar de una única predicción.
El procedimiento resolutivo de los modelos	Modelos analíticos	Los procesos analíticos sin directos y no requieren el uso de iteraciones de ninguna forma.
	Modelos de simulación	La solución de estos modelos se obtiene de forma gradual a través de varios escenarios.

Tabla 2.1 Clasificación de los modelos.

2.3 Proceso de modelado.

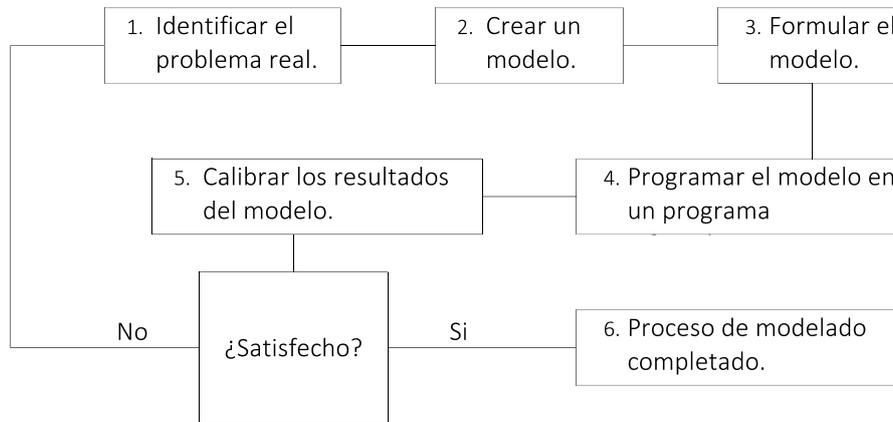


Figura 2.2 Proceso de modelado.

De acuerdo con la figura, el primer paso en la construcción de un modelo consiste en analizar los objetivos que queremos alcanzar y familiarizarnos con los problemas que necesitan solución. Para la segunda parte del proceso, debemos elegir la base teórica apropiada y designar un espacio de trabajo lógico. Si no hubiera una teoría que acompañara nuestro modelo, deberíamos formular hipótesis o suponer cosas para ayudar a establecer la base teórica del modelo.

Para el tercer paso necesitamos formular el modelo en un lenguaje matemático. Este es un momento clave y, normalmente, bastante complicado. La información del mundo real debe ser abstraída y traducida a ecuaciones o definiciones matemáticas. Una vez tenemos la formulación, avanzamos al cuarto paso, lo que significa implementar el modelo en un programa informático y calibrarlo. Esto último implica dos tipos de transformaciones distintas: dar a las variables usadas definiciones precisas empíricas y proporcionar valores numéricos a los parámetros del modelo. Una vez estos datos han sido introducidos, el modelo puede ser codificado en un programa informático y funcionar.

El quinto paso requiere calificar los resultados del modelo. Esto incluye probar la validez y sensibilidad del modelo para comprobar si se comporta de un modo razonable cuando efectuamos cambios en alguna de las condiciones y evaluar si el modelo se asemeja o no al mundo real.



2.4 Enfoques teóricos en la modelización del desarrollo urbano.

- Enfoque ecológico urbano

Se basa en la creencia que el comportamiento humano está determinado por principios ecológicos, como la competición, selección, sucesión y dominancia. Como puede ocurrir en la ecología vegetal, el grupo humano más poderoso obtendrá la mejor posición en un ambiente urbano dado.

- Enfoque físico social

Este enfoque se basa en el concepto de la interacción humana con el espacio. Propone que el movimiento de las actividades humanas, como el cambio de residencia y trabajo entre lugares es directamente proporcional a la actividad en el origen y en el destino, e inversamente proporcional al coste (en términos de distancia o tiempo) que los separa.

- Enfoque neoclásico

El enfoque neoclásico o de equilibrio económico se construye en base a la creencia de que el proceso de desarrollo urbano es, esencialmente, un fenómeno económico impulsado por los mecanismos del mercado y la competición entre actividades económicas y grupos sociales de un área.

Según la teoría económica del equilibrio, la asignación de suelo urbano a varios usuarios está controlada, tanto en aspecto cuantitativo como de localización, por las relaciones de oferta-demanda que obedecen a la ley de mínimo coste y máximo beneficio.

- Enfoque de conducta

Este enfoque se desarrolla a partir de las críticas a la sobre simplificación de los conceptos del comportamiento humano en los enfoques ecológico y neoclásico. El enfoque de conducta pone atención en las motivaciones que hay detrás del comportamiento individual, la forma en que los humanos buscan y aprenden sobre su entorno urbano y su proceso de toma de decisiones.

- Enfoque de sistemas

Se basa en las nociones de la Teoría General de Sistemas (*Ludwig von Bertalanffy, 1968*). Según esta teoría, todo existe en una especie de sistema en el que se convierte en un elemento. Todos los elementos están relacionados entre ellos y vinculados al entorno del sistema. Por ejemplo, un sistema urbano está compuesto por una serie de elementos o subsistemas como la población, terreno, empleo, servicios y transporte, etcétera. Todos



estos elementos interactúan entre sí a través de mecanismos sociales, económicos y espaciales mientras que se relacionan con su entorno. Lo importante es que cada elemento no depende de sí mismo, si no de sus relaciones con otros elementos. Por tanto, la importancia de este enfoque es las relaciones y procesos que conectan todos los elementos de un sistema.

2.5 Prácticas actuales en la modelización del desarrollo urbano.

Gracias a los avances en los sistemas no lineales, fractales y la teoría del caos se han conseguido nuevas formas de ver las ciudades y su desarrollo. La emergencia de las fuentes de datos digitales y de las técnicas GIS (sistema de información geográfica) han hecho posible que los analistas urbanos puedan tener nuevas plataformas y técnicas de manejo, análisis y visualización de datos.

2.5.1 Conjunto y lógica difusos.

Entendiendo que las matemáticas precisas no son siempre suficiente para modelar adecuadamente el comportamiento de un sistema complejo, Zadeh (1962) (1965) desarrollo la teoría del conjunto difuso para poder lidiar con los problemas que no tienen límites estrictos o situaciones en los que los eventos están descritos de forma difusa. La lógica difusa la empleo para describir relaciones difusas en un sistema difuso.

El desarrollo urbano es el resultado de una serie de procesos de toma de decisiones que se caracterizan por un conjunto de incertidumbres a lo largo del proceso. Los conjuntos y la lógica difusos es una forma de enfrentarnos a estas incertidumbres. Si representamos un sistema con una serie de “variables lingüísticas” como “bueno”, “muy bueno” o “moderado”, se define un concepto de grado de pertenencia en un conjunto difuso y se utiliza para representar el alcance de las incertidumbres (Wu, 1996). Mediante un proceso de “difusificación” y de “desdifusificación”, el proceso de la toma de decisión puede modelarse de una forma más parecida al pensamiento humano.

2.5.2 GIS y la modelización urbana.

Se han hecho varios estudios y desarrollado varios métodos, ya que GIS ofrecen nuevas plataformas para el control y visualización de datos.

La integración de GIS y el modelado urbano puede clasificarse según el enfoque que se utilice. Por ejemplo, la incorporación de funcionalidades similares a las de GIS en el modelado, la integración de GIS en el modelo por parte de los programadores de software, un acoplamiento flexible entre el modelo y el paquete GIS mediante el cual hay un constante intercambio de información o un acoplamiento estrecho entre el modelo y los GIS a través de una macro de GIS o programación convencional. La mayoría de los modelos urbanos que utilizan GIS son mediante enfoques de acoplamiento estrecho o flexible.



3. Autómatas celulares.

3.1 Modelos y autómatas celulares.

Los modelos basados en autómatas celulares, que son en los cuales nos vamos a centrar, son modelos de simulación basados en los principios de sistemas no lineales y la teoría del caos. Estos modelos simulan el desarrollo urbano a lo largo del espacio y tiempo y puede usarse para simular varios escenarios “y si”. También encajan en la categoría de modelos basados en teorías y en un modelo general si usamos como criterio de clasificación las cuestiones de fondo. Se consideran tanto modelos descriptivos como normativos y son dinámicos a largo del tiempo.

3.2 ¿Qué es un autómata celular?

Un autómata celular es un modelo matemático para un sistema dinámico compuesto por un conjunto de celdas o células que adquieren distintos estados o valores. Los estados pueden ser alterados de una unidad de tiempo a otra, por lo que el conjunto de células va evolucionando (Wolfram, 1984).

Fue Alan Turing el primero en demostrar que los ordenadores, a través de la programación, podían incorporar reglas que podían “reproducir”. Pero no fue hasta los años 50, que se inició el estudio científico de los autómatas celulares gracias a John von Neumann (*Batty, 1997*). Mientras trabaja en una de sus investigaciones, von Neumann se dio cuenta de las dificultades que suponía crear un robot que se autorreplicara y, un matemático polaco-americano llamado Stanislaw Ulam fue quien le sugirió el uso del autómata celular. Von Neumann creó un complejo espacio de celdas de dos dimensiones, teniendo cada celda 29 estados que funcionaban en una vecindad de cuatro celdas, es decir, las celdas Norte, Sur, Este y Oeste. Este formato de vecindad se llama “la vecindad de von Neumann”. En 1966, von Neumann fue capaz de probar que cualquier patrón podría hacer infinidad de copias de sí mismo en su vecindario.

El primer uso importante de los autómatas celulares fue “El Juego de la Vida”, diseñado por el matemático británico John H. Conway en 1970. Que, a su vez, es una de las formas más sencillas de definir un autómata celular.

3.2.1 El Juego de la Vida.

El juego está basado en la evolución de estados sucesivos, donde las condiciones de un estado dependen únicamente del estado anterior. Es decir, sólo se necesita determinar el estado inicial y las normas del juego.

El juego se desarrolla en un tablero o mundo, teóricamente infinito, aunque en la práctica se acotan unas dimensiones prefijadas. Este tablero está dividido en columnas y filas, formando así celdas. De esta forma, cada celda está rodeada de otras ocho, las cuales determinan su “vecindad”. Esta vecindad, formada por las celdas al Norte, Sur, Este, Oeste, Noroeste, Noreste, Suroeste y Sureste; se denomina “vecindad de Moore”.

Las celdas contienen las células, que pueden presentarse en dos estados distintos: vivas o muertas. El estado futuro de una célula depende tanto de su estado actual como del de sus vecinas. Cuando una célula muere, su celda queda vacía.

El jugador es quien determina las condiciones iniciales de las células mediante la creación de la “población cero” o “generación cero”.

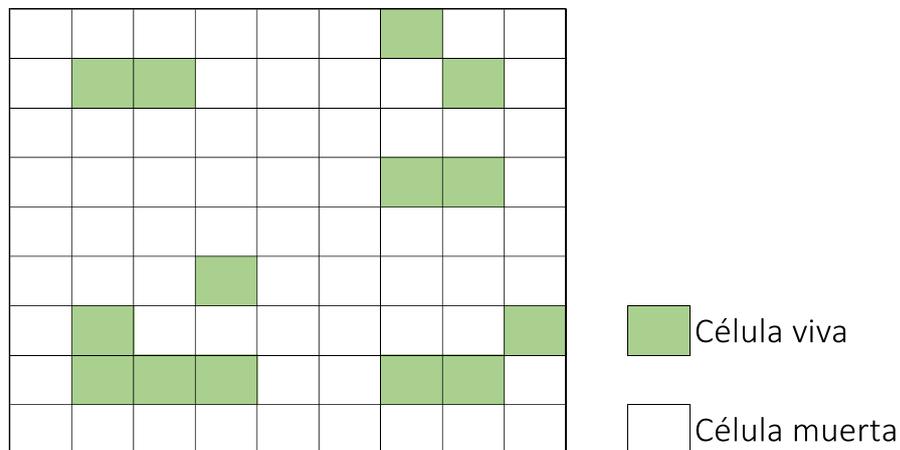


Figura 3.1 Ejemplo de población cero.

Las reglas originales o leyes de genética de Conway son las siguientes:

1. Supervivencia. Si la célula está rodeada de 2 o 3 vecinos sobrevive a la siguiente generación. Es decir, su estado se mantiene inalterado en el siguiente turno.
2. Fallecimiento. Cuando una célula está rodeada por menos de 2 vecinos fallece por aislamiento o soledad en el siguiente estado. Si una célula viva tiene más de 3 vecinos, fallecerá por superpoblación en la próxima generación.



3. Nacimiento. Si una celda vacía está rodeada de 3 vecinos en el siguiente estado, en ese turno, la célula nace y pasa a estar viva.

A medida que pasan los turnos, se puede llegar a distintas situaciones finales:

- Extinción. Al cabo de un número finito de generaciones, todos los miembros de la población desaparecen.
- Estabilización. Después un número finito de generaciones, la población queda estabilizada ya sea de forma rígida e inamovible o de forma oscilante entre dos o más formas.
- Crecimiento constante. La población crece en todos los turnos y se mantiene así durante un número infinito de generaciones. En un principio esta evolución sólo se contempló de forma teórica, aunque luego se encontrarían patrones que crecían de forma indefinida.

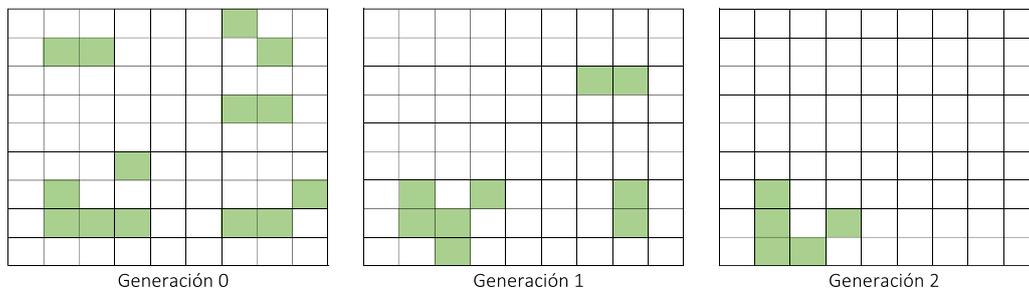


Figura 3.2 Ejemplo de evolución.

3.2.2 Autómata celular elementario.

Gracias al “Juego de la Vida” de Conway, muchos investigadores comenzaron a investigar el modelo de autómata celular y el espacio complejo que puede ser generado a partir de unas reglas básicas.

En 1983, Stephen Wolfram comenzó una serie de estudios sobre el autómata celular de una dimensión, el más básico que existe, a la que llamó “autómata celular elementario”. Cada celda de este autómata sólo tiene dos posibles valores, 0 o 1, y sus reglas de evolución dependen únicamente de los valores de sus vecinos más cercanos. Este modelo generó estados y comportamientos muy complejos, lo que hizo que Wolfram se planteara que la complejidad de la naturaleza podía ser debida a mecanismos familiares (Wolfram, 1984).

Desde el punto de vista de la teoría de complejidad, estructuras complejas pueden ser generadas a partir de simples normas, por lo que puede ser usado como técnica para estudiar un amplio abanico de problemas fundamentales en dinámicas y evolución. Hasta los años 90, los autómatas celulares habían



sido usados en ciencias físicas y naturales como física, química y biología. A partir de estos años se empezaron a investigar y a usar mucho más en el estudio de ciudades.

3.2.3 Elementos básicos de un autómata celular.

A partir de la definición de autómata celular que se ha comentado previamente, se pueden identificar cinco elementos básicos:

1. La unidad básica espacial en el espacio celular es la celda. Estas celdas se disponen en un espacio regular (teselado). La forma más usada al modelar el espacio de los autómatas celulares usados en el desarrollo urbano es una malla de dos dimensiones. También se puede usar un teselado en tres dimensiones, por ejemplo, en forma de colmena de abejas, con lo que se puede incluir la altura de los edificios.
2. Los atributos del sistema están definidos por el estado. Las celdas sólo pueden tener un estado en un momento de tiempo, el cual puede ser un número que represente una propiedad. Por ejemplo, el estado de los autómatas celulares usados en el desarrollo urbano puede representar el tipo de suelo (urbano o rural) u otras categorías, como por ejemplo si la población es nativa o inmigrante.
3. El conjunto de celdas que interactúan con la celda en estudio es el vecindario. En el espacio bidimensional los dos vecindarios más usados son el vecindario de von Neumann (Norte, Sur, Este y Oeste) y el vecindario de Moore (Norte, Sur, Este, Oeste, Noroeste, Noreste, Suroeste y Sureste). También se usa como vecindario todas las celdas que se encuentran dentro de un círculo a una determinada distancia de la celda en cuestión.
4. El cambio de estado de una celda es definido por las reglas de transición. Este es el elemento clave ya que las reglas representan el proceso por el cual se modela el sistema y son esenciales para que este funcione de forma correcta. En un autómata celular estricto, las reglas son uniformes y aplicadas al mismo tiempo a todo el sistema.
5. La dimensión espacial del autómata celular está definida por el tiempo. Los estados de las celdas se actualizan al mismo tiempo a lo largo de un periodo. Aunque hay algunos modelos en los que el tiempo no era uniforme en el modelo, y en función del estado de cada celda estas se actualizan según una escala temporal distinta.

3.2.4 Características complejas de un autómata celular.

Una de las cualidades más atractivas de los autómatas celulares es su capacidad de generar un comportamiento complicado y complejos procesos



a pesar de su simplicidad de construcción. Es decir, el modelo más simple tiene el potencial de reproducir fenómenos complejos (*Wolfram, 1994*).

Los autómatas celulares tienen la característica de un sistema abierto capaz de auto organizarse. Este es un proceso en el cual el sistema aumenta la complejidad de su organización interna sin ser guiado o manejado por una fuente externa. Wolfram (1983) demostró que un autómata celular básico, con un estado “desordenado” inicial, el cual es generado aleatoriamente, es capaz de generar una estructura en la que se aprecian “claros” en forma triangular. La aparición espontánea de estos claros es un ejemplo simple de auto organización (*Wolfram, 1994*).

Otra característica es su capacidad de generar patrones similares (*Wolfram, 1994*). Es decir, a medida que un autómata celular evoluciona a lo largo del tiempo, las figuras que se van generando, normalmente, demuestran cierto grado de regularidad, lo que se traduce en patrones similares. Esta característica indica que las partes que forman el patrón evolucionado de una estructura son indistinguibles del conjunto, por lo tanto, la estructura es independiente de la escala (*Torrens, 2000*) (*Wolfram, 1994*), lo que hace a los autómatas celulares muy atractivos para solucionar el problema de la unidad de área que puede ser modificada en el modelado geográfico.

Además, los autómatas celulares son sistemas dinámicos que atienden a los elementos del sistema que representan a escala local. A través de la interacción con otros elementos dentro de su vecindario, los autómatas celulares son capaces de modelar sistemas complejos a través de simples reglas de transición. Además, también pueden ser usado como una idealización matemática simple de un sistema natural (*Wolfram, 1994*).

3.3 El uso de autómatas celulares en la modelización urbana.

El desarrollo urbanístico se asemeja bastante al comportamiento de un autómata celular. El área urbana se puede analizar como un conjunto de celdas, cada una de ellas pudiendo encontrarse en un estado previamente definido.

Si imaginamos una ciudad construida en un espacio celular, ésta consistirá en una cuadrícula bidimensional de $n \times n$ celdas, es decir, las celdas equivalen a parcelas de terreno. Estas parcelas pueden tener dos estados: urbano o rural. El vecindario representa la región que influye en el desarrollo de la parcela que estamos estudiando. Las reglas de transición determinan como un terreno cambia de un estado a otro.

A la hora de programar, estas reglas suelen ser expresadas como “IF-THEN” y, aunque son muy simples, generan complejos modelos al desarrollarse.

Si asumimos que esta ciudad imaginaria tiene condiciones sociales, económicas y ambientales uniformes a lo largo de todo el terreno, excepto algunas parcelas urbanizadas, es decir, categorizadas como urbanas, tenemos un estado inicial similar a:

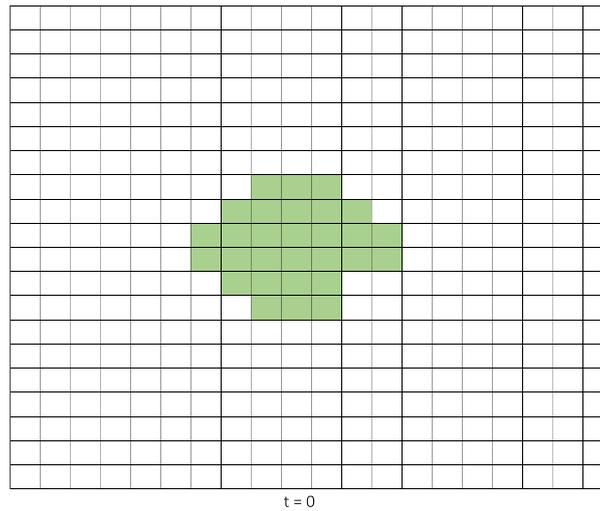


Figura 3.3 Estado inicial de una ciudad imaginaria.

Cómo se puede observar, las celdas en verde serían parcelas urbanas, mientras que las blancas serían rurales, aunque, cómo se ha comentado anteriormente, las condiciones socioeconómicas y ambientales son idénticas. Es decir, el único factor que influye en el desarrollo urbanístico de una celda es el número de parcelas urbanas que hay en su vecindario. Vamos a usar el vecindario de Moore y usar la siguiente regla de transición:

Regla 1:

IF Sí hay tres o más parcelas urbanas en el vecindario de Moore de una parcela rural,
THEN Entonces la parcela rural se desarrollará como urbana.

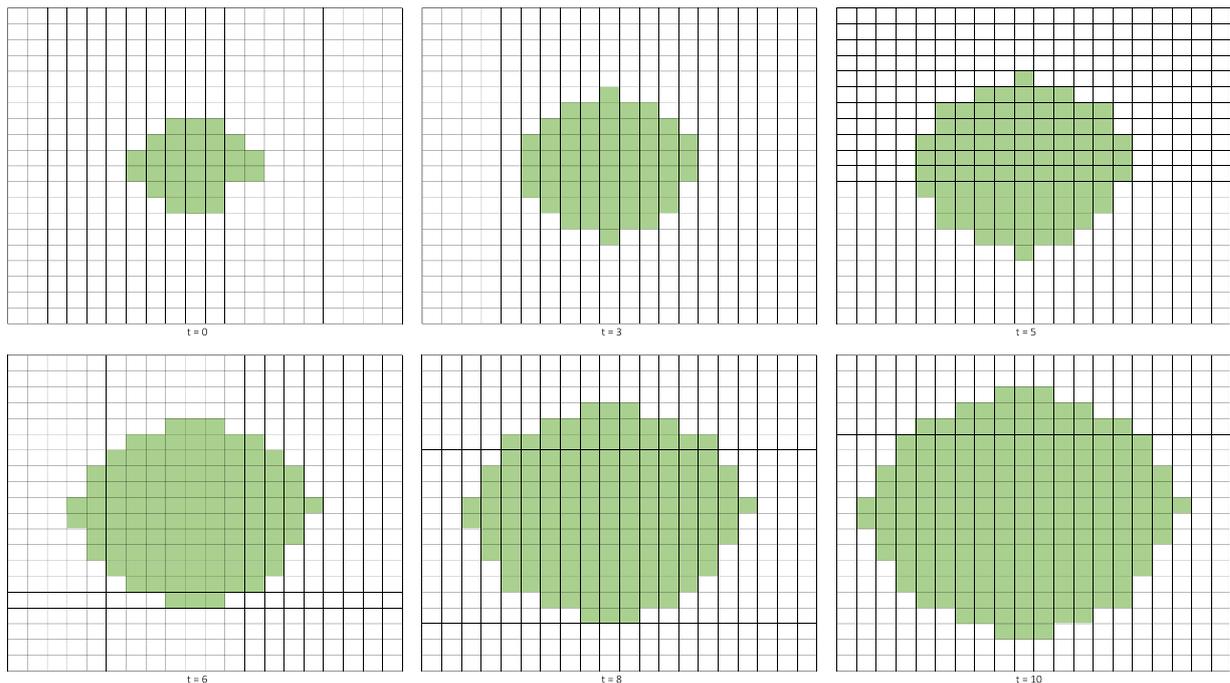


Figura 3.4 Desarrollo urbano mediante un autómata celular.

Pero, en una situación real, las condiciones geográficas de un área nunca podrán ser uniformes. Por ejemplo, para reducir costes tanto de construcción como de mantenimiento de instalaciones municipales (red de alcantarillado, suministro eléctrico y de agua, ...) el desarrollo urbano puede limitarse a áreas de relieve inferior a 300 metros. Es decir, a la regla anterior, tendríamos que añadir una segunda regla de transición:

Regla 2:

IF Si el relieve del terreno es superior a 300 metros,
THEN Entonces la parcela rural permanecerá igual.

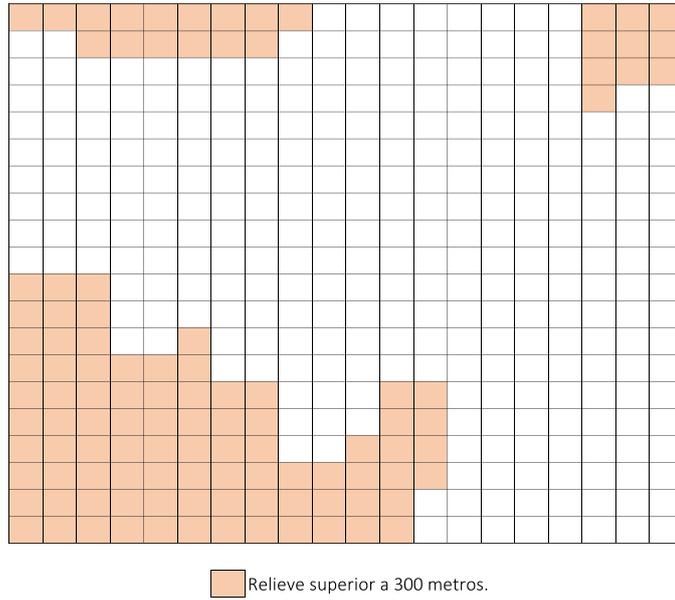


Figura 3.5 Relieve del área.

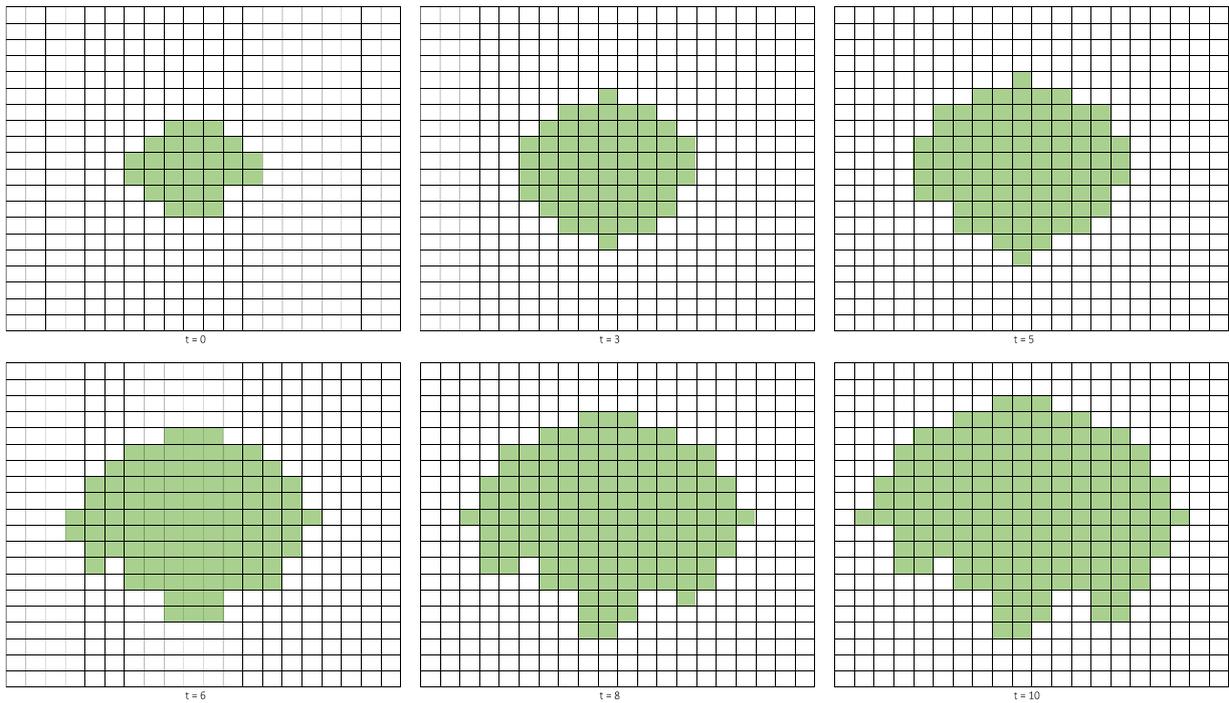


Figura 3.6 Desarrollo urbano a partir de las reglas 1 y 2.

Además, podemos añadir una tercera regla en función de la red de carreteras. Por ejemplo, si hay una carretera principal que discurre por un área, ésta influye a que la población se desarrolle cerca.

Regla 3:

IF Sí en el vecindario de una parcela rural hay una o dos parcelas urbanas y pasa una carretera,
THEN Entonces la parcela rural se desarrollará como urbana.

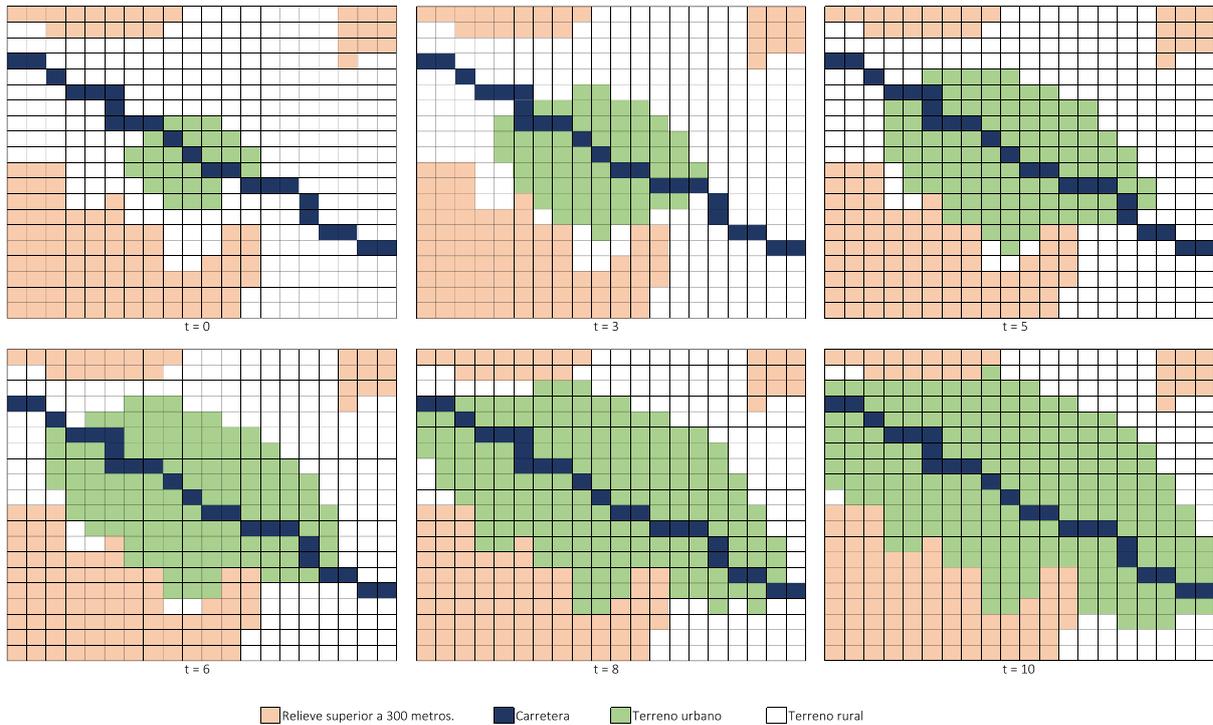


Figura 3.7 Desarrollo urbano a partir de las reglas 1, 2 y 3.

El ejemplo propuesto es muy simple, pero ofrece una visión general de como las reglas de transición afectan al desarrollo urbano. Además, ejemplifica muy bien cómo, a medida que vamos introduciendo reglas simples de transición, el comportamiento del autómata se va haciendo más complejo con el paso del tiempo.

Los autómatas celulares son especialmente apropiados en modelización urbana donde el proceso de expansión urbana es local en su naturaleza y los efectos agregados, como los “boom” de crecimiento, son emergentes (Clarke & Gaydos, 1998), ya que su comportamiento es generado a la aplicación repetitiva de reglas desde la condición inicial.

Debido a esto, los autómatas celulares han sido ampliamente usados en modelización geográfica, sobre todo en estudios de desarrollo urbano, como: Clarke y Gaydos 1998; Clarke, Hoppen y Gaydos 1997; Wagner 1997; White y Engelen 1997, 1994 y 1993; Cecchini 1996; Hillier y Hanson 1984.



Además de lo expuesto anteriormente, los autómatas celulares presentan una serie de ventajas que los hacen más atractivos en su uso de modelización urbana, como:

1. Simplicidad en la construcción del modelo.
Como ya se ha visto anteriormente, la construcción de un modelo urbano basado en un autómata celular es muy sencilla. Basta con un mallado bidimensional y dos posibles estados de sus celdas. La transición de estas celdas se basa en un número de reglas "if-then". Y, como se ha ejemplificado, la auto organización y auto reproducción de los autómatas celulares consiguen, a partir de tan simple diseño, generar complejos patrones espaciales a través del tiempo.

2. Modelización de la dinámica espacial para apoyar los experimentos "What If".
Normalmente, los autómatas celulares prestan más atención a la simulación de los procesos dinámicos del desarrollo urbano y a definir los factores y reglas que dirigen tal desarrollo. Esto se debe a las características que el enfoque de los autómatas celulares ofrece para la modelización dinámica. Está particularmente bien enfocado al modelado de sistemas dinámicos con un gran número de elementos individuales. Con la aplicación de diferentes reglas de transición, el modelo busca explorar como un sistema urbano se desarrolla y como cambia bajo ciertas reglas. Es decir, genera un entorno que apoya los experimentos "what if".

3. Afinidad natural con GIS ráster.
Cuando se modelan procesos y fenómenos geográficos, la mayoría de los modelos de autómatas celulares se basan en espacios regulares teselados. Por lo que, estos modelos están relacionados con GIS basados en ráster. Los modelos GIS pueden proporcionar datos espaciales que forman parte de la configuración inicial del autómata, y los resultados de la simulación pueden exportarse a GIS para un procesamiento posterior, visualización y almacenamiento. La aplicación de autómatas celulares a la hora de modelar el desarrollo urbanístico es "virtualmente imposible sin la gestión de datos de GIS" (Clarke & Gaydos, 1998). Sin embargo, la integración de GIS con los modelos de autómatas celulares es mucho más que un intercambio de datos, almacenamiento y visualización. Las similitudes entre modelos de autómata celular y GIS ráster sugieren un fuerte potencial de una completa integración entre ambos modelos.

3.4 Modelización urbana basada en autómatas celulares.

Los modelos de autómatas celulares han demostrado su capacidad de generar diferentes patrones espaciales basados en reglas de transición definidas localmente. Sin embargo, al comparar los modelos estándar de autómatas celulares, que definen estrictamente



cinco elementos básicos, con los modelos contemporáneos, nos damos cuenta de que, en la práctica, se han interpretado las características de los primeros o, incluso, relajado alguna de sus características para poder abordar los requisitos de algún problema particular a la hora del modelado. Las diferencias entre varios modelos de autómatas celulares se producen a la hora de configurar sus cinco elementos básicos, lo que produce nuevas características a la hora de su aplicación en modelado urbanístico.

- Teselado espacial.

Según las reglas de los autómatas celulares, el espacio celular se tesela en un conjunto de celdas regulares, la resolución espacial de las celdas varía de pequeños a grandes tamaños de celdas. Algunos de los últimos estudios sugieren el uso de unidades espaciales irregulares, lo que puede ayudar a comprender mejor el comportamiento de sistema urbano y de su desarrollo.

Uno de los problemas a la hora de modelar es el tamaño de las celdas. Dado que los modelos de autómatas celulares se basan en un espacio dividido en celdas, una de las preguntas más importantes es el tamaño de las celdas mediante las cuáles dividimos el espacio. La resolución de las celdas varía significativamente en función de la aplicación del modelo, ya que, a menor tamaño de celda, mayor resolución tendrá y mayor manejo de datos tendremos.

Se han hecho varios estudios, pero no hay ningún resultado claro que determine que tamaño de celda escoger. Normalmente, se suele coger una resolución de celdas de 200 metros, pero esto es debido a un ahorro de tiempo a la hora de hacer los cálculos. Hay que tener en cuenta que el tamaño de las celdas si afecta a los resultados del modelo, especialmente en relación con ciertos factores como carreteras y pendientes. Si se calibra el modelo para obtener y usar datos de mayor resolución, el modelo generará un conjunto de parámetros espaciales distintos, lo que puede hacer que los resultados del modelo sean diferentes a los que obtendríamos si usáramos celdas de mayor tamaño y menor resolución.

White y Engelen (2000) señalaron que “si el espacio a ser modelado ya está dividido en unidades funcionales que tienen aproximadamente el tamaño de la cuadrícula, entonces dichas unidades serán una mejor representación del espacio del que se obtendría usando las celdas de la cuadrícula”. Sin embargo, debido a los problemas en la definición de un vecindario irregular y de las complicadas operaciones de cálculos que requiere, el uso de unidades espaciales irregulares no es muy popular.



- Estados binarios y continuos.

La mayoría de los autómatas celulares en el estudio del crecimiento urbano configuran el estado de sus celdas en función del uso del terreno o del tipo de terreno. Por ejemplo, White y Engelen (2000) definieron una jerarquía de cinco estados en función del uso del suelo que van desde vacío (el rango más bajo), residencial, industrial hasta comercio (mayor rango). Una celda sólo puede evolucionar de un estado bajo a uno superior, representando así el crecimiento urbano.

Otros estudios usan estados binarios para representar el proceso de conversión de un terreno de rural a urbano. El estado de urbano o rural se puede definir en términos de uso del terreno, aunque también según otros indicadores como la densidad de población u otros indicadores socioeconómicos.

- Definición de vecindario.

De acuerdo con las reglas estándar de los autómatas celulares, el estado de una celda está determinado por el estado de la propia celda y el estado de las celdas de su vecindario en la unidad previa de tiempo. Cada cambio de estado es local. Es decir, únicamente las celdas adyacentes (las que conforman el vecindario de Moore o de von Neumann) tienen un impacto en la transición de estado de la celda central. En resumen, no existe “acción a distancia” en el modelo estándar de autómatas celulares. Pero, algunos estudios han usado la “acción a distancia”. Por ejemplo, White y Engelen (1993) utilizaron un vecindario compuesto por 113 celdas comprendidas dentro de una circunferencia de seis celdas de radio. Aplicaron el efecto de pérdida de influencia, es decir, a mayor distancia de la celda central, menor influencia tiene la celda sobre la central.

A su vez, Wu (1996) utilizó un vecindario rectangular de 5x5 celdas para simular el desarrollo urbanístico en China. Aunque está aceptado que la influencia de las celdas puede darse a la distancia, el problema es determinar a partir de que distancia dejan de influenciar las celdas a la celda central y como de importante es dicha influencia.

Se ha visto que los modelos de autómatas celulares responden de forma diferente en función de la resolución espacial o el tipo de vecindario. Se considera que los modelos de autómatas celulares son sensibles a:

- Cambios en la escala espacial si el tipo y tamaño de vecindario son constante.



- Cambios en la escala espacial si el tamaño del vecindario es constante, aunque se cambie el tipo de vecindario.
- Cambios en el tamaño del vecindario si la escala espacial y el tipo de vecindario son constantes.
- Cambios en el tipo de vecindario si la escala espacial es constante, aunque el tamaño del vecindario cambie.

Menard y Marceau (2005) estudiaron la combinación de efectos de las escalas espaciales y del vecindario. Demostraron que la elección de la escala del vecindario es menos influyente en los resultados de simulación. Ésta adquiere importancia a medida que se aumenta el tamaño del vecindario (por ejemplo, un vecindario circular de radio cinco celdas) o cuando se usa un vecindario de tamaño intermedio (vecindario circular de radio dos celdas) combinado con un tamaño de celda grande (1000 m).

- Variación de las reglas de transición.

La función principal de las reglas de transición es servir como algoritmos que generan el cambio de estado de las células a lo largo del tiempo.

Los modelos actuales de autómatas celulares de crecimiento urbano comenzaron con la investigación y desarrollo de White y Engelen (1993), que desarrollaron y aplicaron por primera vez un modelo de autómatas celulares restringido para simular las dinámicas de cambio del uso del suelo. El modelo que usaron tenía en cuenta varios tipos de restricciones, como las debidas a las cualidades del terreno, el uso de los terrenos vecinos y la demanda de los distintos usos del terreno. Es decir, el modelo tenía dos partes: un modelo a macro escala y un modelo a microescala.

El modelo a macro escala se formó a partir de un modelo celular basado en factores como la población y su estado socioeconómico. Esto genera restricciones con diferentes usos del suelo, que fueron aplicadas para controlar la cantidad de celdas que había en cada estado.

En el modelo a microescala se estimó un conjunto de potenciales de transición que representan la idoneidad de una celda para el cambio de estado. Los potenciales de transición fueron calculados en función de una serie de factores como la accesibilidad a la red de carreteras, la idoneidad del terreno, el estado de zonificación y el impacto del vecindario en la celda para un determinado uso. Las celdas son clasificadas en función de su mayor potencial de transición, y el estado de cada celda cambia al estado para el que tenga mayor potencial. Pero, el número de celdas en cada estado está restringido por el modelo a macro escala. El proceso de cambio de estado comienza por la celda con mayor potencial de transición y continua de forma descendente. Cuando el cupo de un estado se ha cubierto, los potenciales de transición de ese estado se ignoran. Por lo que habrá celdas que no pueden evolucionar al estado para el que tienen potencial, en ese caso, las



celdas no cambian de estado. El modelo con restricciones proporciona una nueva forma de trabajo que permite integrar autómatas celulares con otros modelos socioeconómicos o ambientales, ya que se puede operar tanto a macro como a microescala geográficas.

Estudios han demostrado que las reglas de transición no tienen por qué ser restrictivas de forma determinista. Se ha estudiado utilizar reglas más flexibles, lo que indica que el comportamiento del sistema puede funcionar mediante la definición de reglas de transición basadas en la teoría de conjuntos difusos (*Wu, 1996*) (*White & Engelen, 2000*). Ya que el desarrollo urbano es el resultado de limitaciones físicas y la toma de decisiones humana, las cuales se caracterizan por su incertidumbre e imprecisión, la aplicación de la teoría de conjuntos difusos y control lógico difuso son buenas opciones a la hora de definir las reglas que controlan el desarrollo urbano.

Wu (1996) diseñó una simulación basada en un autómata celular lingüístico. En esta simulación, las reglas de transición fueron fijadas para integrar el proceso de toma de decisión, es decir, fueron definidas a través de enunciados vagos y subjetivos en lenguaje natural para describir determinadas condiciones previas a una decisión. Por ejemplo, en el proceso de cambio de un terreno rural a uno urbano, este terreno está condicionado a tener buena accesibilidad. Las reglas en lenguaje natural permiten la introducción del control lógico difuso para simular el proceso de toma de decisión, lo que hace la estructura del modelo más transparente y comprensible. Esto supone una herramienta muy útil a la hora de generar simulaciones de distintos escenarios.

Otro método utilizado es la incorporación de otra metodología de modelado en el modelo, especialmente para definir las reglas de transición. Modelos matemáticos incorporan procesos analíticos jerárquicos, enfoques de evaluación multicriterio, análisis de regresión múltiple, análisis de componentes principales, etc. Por ejemplo, Wu (1998) y Wu y Webster (1998) desarrollaron SimLander, un modelo que integra GIS, autómatas celulares y procesos analíticos jerárquicos (AHP, de sus siglas en inglés analytical hierarchy process) como componentes interrelacionados. El método de procesos de jerarquía analítica se utilizó para derivar las reglas de transición orientadas al comportamiento utilizando la comparación por pares para obtener la preferencia de los responsables de la toma de decisiones. Este método fue desarrollado por Thomas L. Saaty en 1980. Los resultados del AHP fueron usados como un indicador de la probabilidad de conversión de un terreno, alimentando así al modelo de autómatas celulares en la configuración de las reglas de transición. A su vez, GIS se utilizaba como la estructura de modelado y para visualizar los resultados de las simulaciones.

El principal objetivo de usar métodos matemáticos para configurar las reglas de transición de los autómatas celulares es la evaluación de la idoneidad o probabilidad de un terreno para su desarrollo.



- Modelación.

El desarrollo urbano es un proceso que ocurre a lo largo del tiempo y del espacio, es decir, necesitamos tener en cuenta las dimensiones espaciales y temporales.

Según Snodgrass (1992), hay varias definiciones de tiempo en el contexto de la base de datos de GIS, que incluyen:

1. La hora real del mundo cuando ocurre un cambio.
2. El tiempo de actualización cuando se registran los datos geográficos.
3. El tiempo cartográfico cuando se publican los resultados de los datos.
4. El tiempo de la base de datos (transacción) cuando se registran los cambios en la base de datos.

Como ya hemos comentado, en los autómatas celulares el tiempo es un componente fundamental ya que, al final, el cambio de estado de una celda está definido por los estados de la propia celda y de su vecindario en la unidad de tiempo anterior. Por lo tanto, los modelos de autómatas celulares necesitan, además de la configuración espacial, una configuración temporal. La mayoría de los modelos se configuran iniciando el modelo a partir de un momento determinado en el que se disponen los datos espaciales, procediendo después a dejarlo funcionar durante un número de iteraciones hasta que los resultados de la simulación encajen con otro conjunto de datos en el momento final. Por lo tanto, estos no están configurados temporalmente, no están diseñados para simular el proceso del desarrollo urbano a lo largo del tiempo.

3.5 Modelos basados en autómatas celulares

A continuación, se detallan varios estudios y modelos en los que se han utilizado los modelos de autómatas celulares en el desarrollo urbano.

3.5.1 Barredo et al. y el modelo de Dublín, Irlanda (2003).

3.5.1.1 Introducción al modelo.

Como los autores indican en su estudio, las ciudades son una de las estructuras más complejas que existen, contando con la peculiaridad de que cada una de ellas es diferente de otra, aunque existen algunas características comunes a todas. Dos elementos que caracterizan a todas a las ciudades son su crecimiento y dinamismo.



Las ciudades se caracterizan por complejos patrones del uso del terreno. La complejidad de las ciudades se puede analizar desde dos puntos de vista: su complejidad representa una valiosa información del sistema o la complejidad es necesaria para el funcionamiento de la ciudad como un sistema.

Considerado este punto de vista, Barredo et al. se plantean dos cuestiones que son la base de su estudio. La primera, considerando que los patrones del uso del terreno tienen su propia lógica, es si estos patrones responden a factores que puedan ser medidos. La segunda es de qué forma estos patrones contribuyen a las dinámicas del uso del terreno en las ciudades.

Uno de los fundamentos básicos en el análisis espacial es la primera ley de la geografía de Tobler “todo está relacionado con todo, pero las cosas cercanas están más relacionadas que las lejanas”.

Hay cinco grupos de factores que influyen a la hora de clasificar un terreno para un uso concreto que son los siguientes:

- Características ambientales, las cuales pueden ser una limitación en el crecimiento urbano, como pueden ser las montañas.
- Características del vecindario en una escala local. Por ejemplo, al lado de un polígono industrial es poco probable que se construya un área residencial.
- Características espaciales de la ciudad, como su accesibilidad, redes de transporte, distancia al centro, etcétera.
- Políticas de desarrollo urbanas y regionales.
- Factores relacionados con los individuos, como sus preferencias, nivel económico, etcétera.

La suma de todos estos factores, además de la decisión humana, generan los complejos sistemas dinámicos que conforman el crecimiento y desarrollo de una ciudad.

3.5.1.2 El método de análisis.

Barredo et al. eligieron para su estudio un modelo urbano basado en autómatas celulares limitados. Este modelo presenta las siguientes características:

- Las celdas.

El modelo está configurado por celdas cuadradas que representan, cada una, una superficie de 100 m x 100 m. Además, se asume que el espacio celular no es homogéneo. Para ello, cada celda se caracteriza por un vector de idoneidad, una idoneidad por cada posible uso del terreno. Estas idoneidades son una suma lineal ponderada de una serie de factores físicos, ambientales e institucionales que caracterizan cada celda. Esto se normaliza a valores comprendidos entre el 0 y el 1, representando así la capacidad de una celda para tener una categoría de uso u otro.



A parte, cada celda tiene asociado un vector de factores de accesibilidad, de nuevo un por cada tipo de uso del terreno. Este vector representa la importancia del acceso a redes de transporte de algunos tipos de uso.

Por último, a cada celda se le asocia una serie de códigos que representan su estado de zonificación para diversos usos del suelo y diversos periodos.

Gracias a la combinación de la idoneidad, accesibilidad, zonificación y el efecto del vecindario, cada celda es única en sus cualidades respecto a los posibles usos del suelo.

- El vecindario.

Se consideró un vecindario circular de radio de 8 celdas. Es decir, el vecindario está compuesto por 172 celdas que, a su vez, se agrupan en 30 zonas diferentes en función de la distancia.

El radio del vecindario equivale a 0,8 kilómetros, que es lo que el ser humano asocia a su vecindario en la vida real.

- El estado de la celda.

El estado de la celda representa los posibles tipos de uso y en el modelo usan 22 estados distintos. Estos estados se clasifican en: características fijas, estados que se asume que no cambian y no participan en las dinámicas, aunque si afectan a las dinámicas de los estados activos; estados pasivos, participan en las dinámicas del uso del suelo, pero son una respuesta a la toma o abandono del suelo por parte de las estados activos y estados activos, que son aquellos tipos generados por la demanda que se crea al crecer un área urbana.

Estados fijos	Estados pasivos	Estados activos
Red de carreteras	Tierras de cultivo	Zonas residenciales densas
Red de ferrocarriles	Tierras de pasto	Zonas residenciales medias
Aeropuertos	Bosques	Zonas residenciales discontinuas
Lugares de extracción de minerales	Zonas de arbustos	Zonas residenciales discontinuas escasas
Vertederos	Zonas de poca vegetación	Zonas industriales
Zonas de vegetación	Humedales	Zonas comerciales
Zonas de agua (lagos, ríos y similares)		Servicios públicos y privados
		Zonas portuarias
		Zonas abandonadas



- El efecto del vecindario.

Se considera que las celdas más cercanas tienen mayor influencia que las celdas a más lejanas.

- Las reglas de transición.

Para cada celda se calcula un vector de potenciales en función de su idoneidad, accesibilidad, zonificación y el efecto del vecindario. A partir de esto, se obtiene un valor potencial. La regla de transición funciona cambiando cada celda al estado para el cual tengan el mayor potencial, aunque está limitado a que el número de celdas que hay en un estado debe ser igual a la demanda que haya de dicho estado en esa iteración. En cada iteración las celdas se ordenan en función de su potencial más alto y comienza la transición de cada celda, de mayor potencial a menor, hasta que cada estado tiene el número de celdas demandadas. En este modelo consideran que cuando una celda transiciona de un estado a otro, este tiempo ocurre después de una iteración (un año) de retraso y, durante este intervalo, la celda tiene el estado de “en construcción”.

3.5.1.3 Resultados.

Para probar el modelo realizaron una simulación de la ciudad de Dublín entre 1968 y 1998. Se comenzó usando los datos históricos de 1968 y para comprobar los resultados de la simulación usaron los datos de 1998 como referencia.

Para calibrar el modelo usaron el conjunto de datos del uso del suelo de MOLAND (MONitoring LANd use Dynamic; seguimiento de las dinámicas del uso de suelo). Debido a que no había datos disponibles sobre la zonificación, no pudieron usar esta variable.

Para comprobar los resultados el modelo se probó de tres formas:

1. Comparación visual de los mapas.
2. Comparación de los patrones de distribución de los tipos de suelo mediante medidas relativamente abstractas.
3. Evaluación cuantitativa del grado de coincidencia entre los mapas de uso del suelo usando matrices de comparación.

La primera forma, la más intuitiva, comparaba el mapa obtenido en la simulación y el mapa real en 1998.

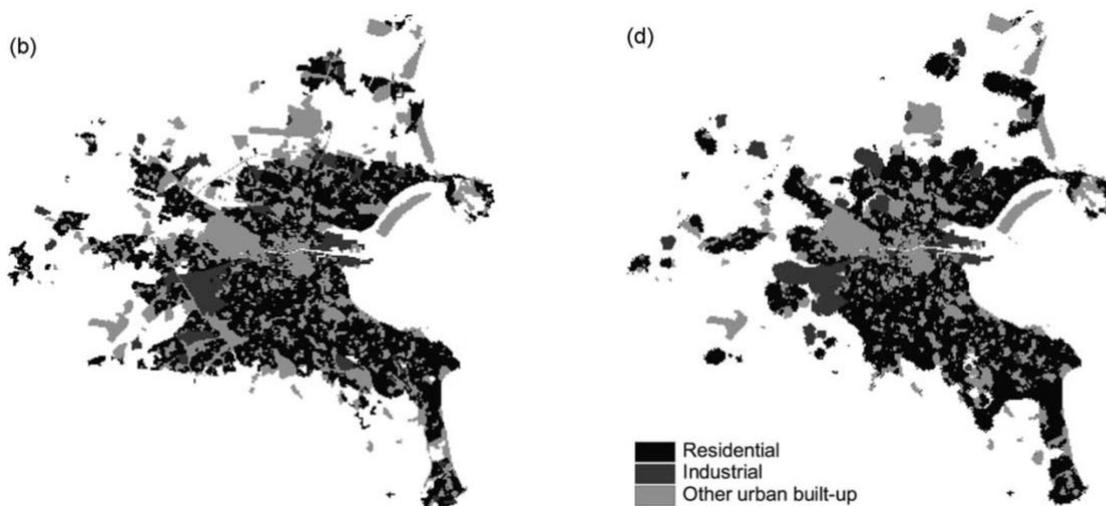


Figura 3.8 Mapas de Dublín. A la izquierda el mapa real de la ciudad en 1998. A la derecha el mapa obtenido de la simulación.

Como se observa hay buena similitud visual entre ambos mapas y, el mapa simulado se asemeja a una ciudad. Aunque este último muestra el terreno urbano menos fragmentado que en la realidad. También se nota que el modelo no es capaz de reproducir algunos patrones, como una nueva área residencial donde había terrenos de pasto.

Para la segunda forma de comprobación usaron la dimensión radial o fractal. Esta dimensión puede ser interpretada como la pendiente entre el tamaño de un objeto, medido por el número de celdas que lo forman, y su diámetro. Para la obtención de la dimensión fractal en este estudio calcularon el área total ocupada por cada tipo de suelo dentro de un radio determinado desde el centro de la ciudad, usando una serie de incrementos de radio de 1000 metros, lo que se traduce en 21 zonas de radio para la ciudad. La pendiente de la línea de regresión en el gráfico área-radio corresponde con la dimensión fractal de ese tipo de uso.

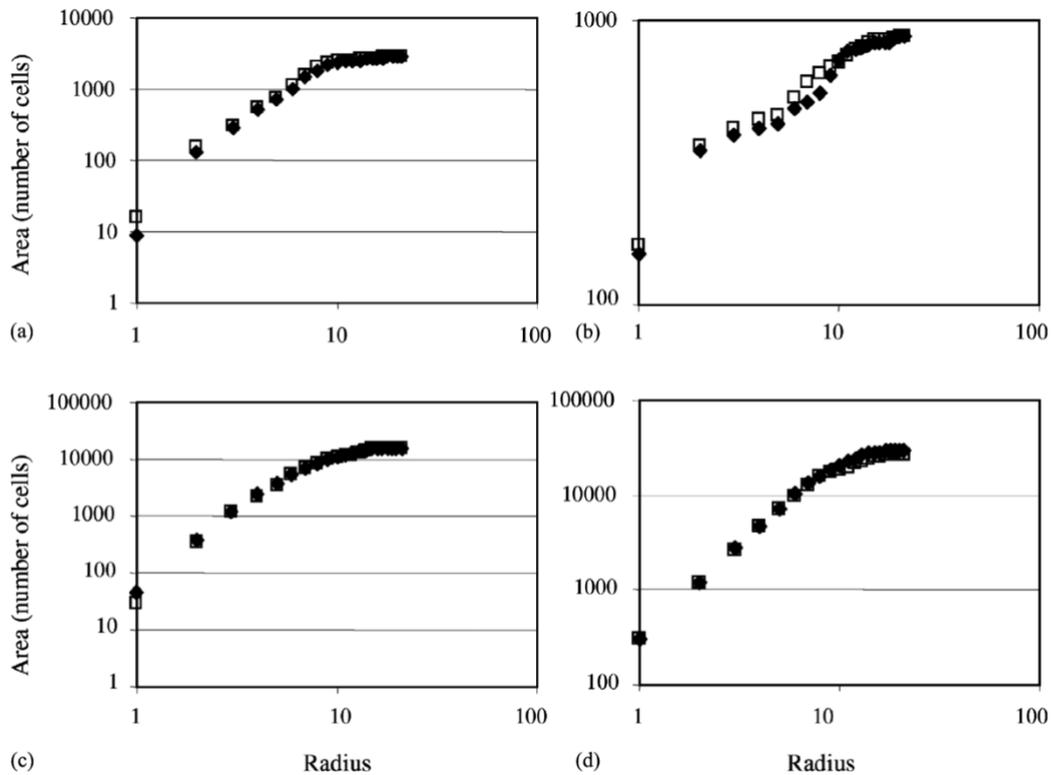


Fig. 3. Area-radius plots for Dublin (◆) and simulation (□): (a) industrial; (b) commercial; (c) residential; (d) urbanised area.

Figura 3.9 Gráficos usando los rombros negros para los datos reales y los cuadrados blancos para los resultados simulados para los tipos de suelo (a) industrial, (b) comercial, (c) residencial y (d) áreas urbanas.

Como se puede comprobar, hay alguna pequeña diferencia entre la ciudad real y la simulación, pero los resultados obtenidos son muy similares a los reales.

En la última forma de comprobación se evaluó el grado en el cual los dos mapas coinciden mediante una matriz y el índice de coincidencia asociado. De esta forma se puede comprobar que celdas son idénticas en ambos mapas, ya que se considera una comparación celda a celda. Aunque hay varias cosas que no coinciden algunos tipos de suelo como el comercial o las zonas residenciales discontinuas presentan muy buenos valores de coincidencia.

3.5.1.4 Conclusiones.

Los resultados que obtuvieron Barredo et al. demuestran que los modelos de autómatas celulares pueden ser una representación razonable de la evolución futura de una ciudad. El modelo que realizaron, aunque con restricciones, reproduce de una forma muy fiel a la realidad el crecimiento urbano en un periodo de tiempo bastante largo.



3.5.2 White y Engelen y el modelo LeefOmgevingsVerkenner (2000)

3.5.2.1 Introducción al modelo.

El LeefOmgevingsVerkenner (Environment Explorer) es un modelo integrado de tipos de uso del terreno y de distribución regional de la población y actividad económica en los Países Bajos. Para ello combina un modelo de uso del terreno basado en autómatas celulares con un modelo regional de interacción espacial basado en la localización de factores económicos y demográficos. Este modelo cubre todo el terreno de los Países Bajos, siendo la resolución del modelo de autómatas celulares de 500 metros mientras que el modelo a macro escala opera en 40 regiones económicas centradas en la ciudad denominadas COROPs.

El modelo se rige por las proyecciones nacionales de población y actividad económica, y existen tres tipos de proyecciones correspondientes a tres escenarios relacionados con el futuro de la economía europea y global. La proyección correspondiente al futuro deseado es un dato que se introduce en el modelo a macro escala, el cual en cada iteración asigna nuevas actividades a los COROPs y reasigna las actividades existentes en función de la competitividad relativa de las regiones. Las estimaciones regionales se convierten, mediante funciones de productividad, en demandas regionales de usos de suelo correspondientes a cada actividad (vivienda, industria, bosques, ...). Estas demandas son las limitaciones de los autómatas celulares, que son los que determinan los patrones reales del uso del suelo. La información de las densidades y adecuaciones regionales es enviada desde el autómatas celular al modelo a macro escala, donde influyen para las demandas generadas en la siguiente iteración.

El principal objetivo que White y Engelen perseguían con este modelo era proveer al usuario una herramienta para explorar los efectos o alternativas de las distintas políticas económicas y ambientales. Los Países Bajos es un país con una alta densidad de población, en el que las políticas medio ambientales tienen una gran importancia al igual que la calidad de vida de las personas. Este modelo busca desvelar las posibles consecuencias locales de tomar una decisión u otra, tanto a nivel de uso de suelo como a nivel socioeconómico.

3.5.2.2 El modelo de autómatas celulares.

White y Engelen desarrollaron un modelo compuesto por 351.000 celdas de 500 metros x 500 metros. En él, identificaron dieciséis tipos de suelo distintos, divididos en categorías activas, aquellas que las dinámicas están completamente modeladas; categorías pasivas, su comportamiento dinámico



es por efecto de las dinámicas de las categorías activas; y categorías fijas, no cambian ni son influenciadas, son carreteras, ríos, ...

Con cada iteración se calcula un vector de transición para cada celda, siempre y cuando esta no presente un estado fijo. Este potencial refleja los efectos de atracción y repulsión del vecindario sobre la celda, así como los efectos de la accesibilidad de esta a las redes de transporte, su idoneidad para un uso particular y las normas de zonificación del uso del suelo.

El efecto del vecindario es calculado dentro de un radio de ocho celdas. Dentro de este radio se diferencian treinta zonas distintas en función de su distancia al centro. Las celdas que conforman el vecindario se ponderan en función de su distancia al centro y su tipo de suelo, de esta forma se calcula su potencial de influencia.

Una vez se ha calculado el vector de potenciales, se determina la transición de estados. Lo primero es determinar el número de celdas que puede haber en cada estado mediante el modelo regional. Luego, a cada celda se le asigna el estado para el cual tiene el mayor potencial, siendo esta asignación en orden descendente de potenciales. Pero, cuando un estado alcanza el número máximo de celdas que puede tener, el resto de las celdas que tiene potencial para dicho estado no transición en esta iteración. En el caso en el que no se pueda satisfacer la demanda de un estado, la función de productividad que relaciona el nivel de actividad con la demanda de un estado, aumentará la densidad en esa región para reducir la demanda de dicho tipo de suelo.

3.5.2.3 El modelo regional vinculado.

Este modelo es el responsable de generar los niveles de actividad para la población y los sectores económicos en cada uno de los cuarenta COROPs, basándose en ecuaciones clásicas de interacción espacial complementadas para tener en cuenta el efecto de las densidades, niveles de idoneidad y niveles de potenciales celulares en las regiones.

El modelo asigna a cada COROP una actividad en función del crecimiento nacional y reasigna parte de la actividad existente entre el resto de las regiones, representando de esta manera la competitividad existente entre ellas. A su vez, genera las demandas de actividad.

Una vez se establece la demanda de actividad, estas se transforman de demandas de tipos de suelo, que se usaran como limitaciones del modelo de autómatas celulares.



En cada iteración, la productividad o densidad se ajusta en función de la demanda de cada actividad. Así, las mayores demandas de actividad tienden a aumentar la productividad del terreno, mientras que disminuyen los potenciales medios y aptitudes. Las nuevas productividades se utilizan para establecer la demanda de las celdas, que se trasladan al modelo de autómatas celular. Si el autómatas es incapaz de satisfacer la demanda de celdas en una región, lo que hará es reasignar parte de la demanda en otras regiones. Los usos del terreno con menor potenciales tienen mayor prioridad para su reasignación a otras regiones.

3.5.2.4 Resultados

El modelo completo se calibro usando los datos de 1989 y se simuló hasta 1993. Se probó a simular cada modelo de forma independiente, pero los resultados indicaron que, al usar el modelo conjunto, la estimación de la población de los COROPs mejoró entre un 65 y 70%.

3.5.2.5 Conclusiones.

White y Engelen destacan que, aunque originalmente los autómatas celulares se desarrollaron para investigar el comportamiento de los sistemas dinámicos, han demostrado la gran capacidad que tienen para modelar sistemas geográficos de forma realista y precisa.

Su estudio abrió las puertas a la investigación y uso de autómatas celulares integrados en otros modelos.

3.5.3 Feng et al. y el modelo Songjiang, China (2016).

3.5.3.1 Introducción al modelo.

Feng et al. diseñaron este modelo para simular el crecimiento urbano de un suburbio de Shanghái, China, el distrito de Songjiang. Para ello utilizaron un modelo de autómatas celulares basado en un algoritmo de recocido simulado (SA, algoritmo de búsqueda metaheurística para problemas de optimización global) que ya había sido usado con éxito para simular el crecimiento urbano en uno de los suburbios de Shanghái. El modelo que presentan Feng et al. está programado en torno a funciones que minimizan las diferencias entre los patrones de uso del suelo observados y simulados, dando como resultado una mejor precisión de localización que usando autómatas celulares de regresión lineal. También emplearon otros algoritmos de optimización como algoritmos genéticos (GA) u optimización por enjambre de partículas (PSO).



Para obtener mejores resultados y una simulación más precisa, utilizaron la regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS). Este método tiene tres grandes ventajas:

1. Elimina la redundancia de datos y es capaz de extraer componentes de variables espaciales altamente correlaciones que mejor representan y explican las variables dependientes (como la conversión del tipo de terreno).
2. Evita los efectos perjudiciales de la multicolinealidad y es posible hacer una regresión si el número de observaciones es inferior al número de variables.
3. Integra las funciones básicas de los modelos de regresión, el análisis de componentes principales y el análisis de correlación canónica.

Es decir, el PLS busca los componentes principales que explican la mayor parte de la covarianza entre las variables independientes y dependientes. Los parámetros obtenidos mediante este método pueden explicar mejor las variables dependientes, como la probabilidad de conversión del crecimiento urbano.

El estudio que presentan combina el modelo de autómatas celulares con el enfoque PLS. De esta forma consiguen derivar los componentes principales de las variables espaciales para la regresión de los parámetros de los autómatas celulares. Gracias al uso del PLS, pueden extraer variables no correlacionadas entre las variables explicativas y de respuesta. El resultado que obtienen son reglas de transición muy importantes a partir de una serie de factores determinantes que pueden estar muy correlacionados.

3.5.3.2 El modelo.

Para la simulación del modelo urbano eligieron nueve factores que afectan al uso del suelo en Songjiang, los cuales están basados en variables de distancia, de vecindario y limitaciones. Estas variables son: distancia al centro urbano, al centro de la ciudad, a carreteras principales, a tierras agrícolas y a espacios verdes; vecindario de 3x3, limitaciones locales y globales; y un factor estocástico.

Debido a la ubicación de Songjiang y que se encuentra en el delta de río Yangtzé, omitieron el impacto de la pendiente del terreno en el modelo. Las variables basadas en la distancia, así como el vecindario representan los efectos de la aglomeración en el desarrollo urbano y el poder de atracción que generan las infraestructuras. Las variables espaciales son categorizadas en como distancias positivas y negativas. Las positivas son las distancias al centro de la ciudad, a centros urbanos y carreteras principales, es decir, factores que atraen e impulsan el crecimiento urbano. Las distancias negativas son las que frenan dicho desarrollo, como pueden ser la distancia a terrenos agrícolas y espacios verdes.

El modelo está estructurado en cinco pasos:

1. Recolección de datos. Los datos que usan incluyen imágenes rasterizadas históricas como imágenes de teledetección, mapas vectoriales administrativos, mapas topográficos y de carreteras.
2. Procesamiento de datos. Mediante la herramienta de análisis espacial ArcGIS se extraen las variables espaciales de los datos. Las cinco variables espaciales se normalizan.
3. Reglas de transición. En este paso se derivan los componentes espaciales no correlaciones mediante el PLS y se determina si cumplen los criterios de validación cruzada y, por lo tanto, se pueden usar para definir los parámetros del autómata celular con los que se obtiene la probabilidad de conversión de un terreno.
4. Otros factores del autómata celular. Aquí se incluyen factores como el efecto del vecindario, las limitaciones del terreno, etcétera.
5. Implementación y evaluación del modelo. Aquí se simula el modelo y se evalúa su exactitud.

3.5.3.3 Resultados.

En la simulación, los tipos de uso de suelo se simplificaron en urbano, no urbano y agua.

Visualmente, entre el crecimiento real de Songjiang entre 1992 y 2008, la simulación es muy similar al mundo real.

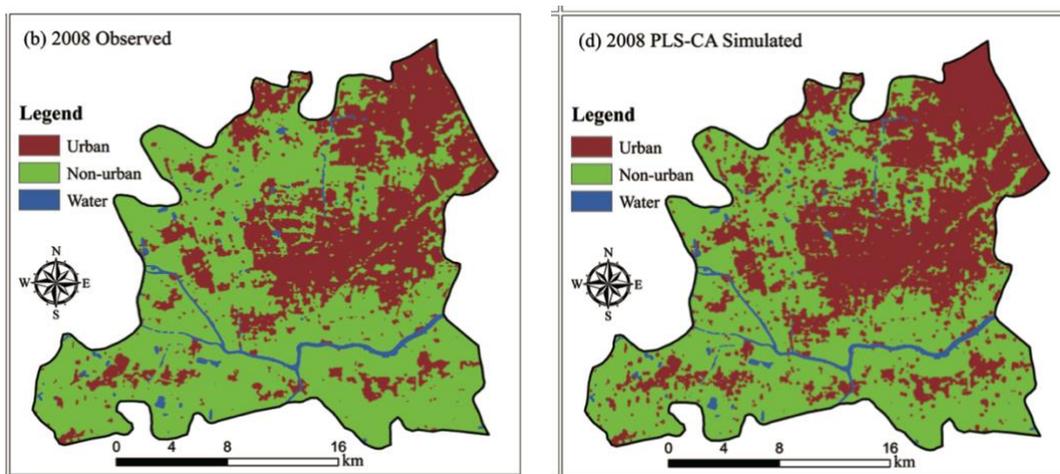


Figura 3.10 Comparativa del mapa real y el mapa simulado mediante PLS-CA.

Para comprobar los resultados desde el punto de vista de la exactitud, se realizó una comparación píxel a píxel para calcular una matriz de confusión. Se obtuvo un nivel de concordancia de más de un 85%.



3.5.3.4 Conclusiones.

En el estudio compraron, para el mismo modelo, el uso de un modelo típico de autómatas celulares con el modelo de autómatas celulares con enfoque PLS. Los resultados que obtuvieron fueron que con el enfoque PLS los resultados eran de un 2,3% más exactos.

El desarrollo urbano es un sistema bastante complejo que es afectado por varios factores. Si integramos las funciones analíticas del GIS, se puede utilizar la regresión logística para evaluar el impacto de estos factores. Los resultados obtenidos por Feng et al. muestran que los patrones de crecimiento urbano coinciden con los patrones reales.

Con el estudio, Feng et al. demuestran que los modelos de autómatas celulares pueden simular de forma muy real el crecimiento urbano mediante el uso de limitaciones locales y globales. Una de las grandes ventajas de simular con bases GIS es poder identificar los factores que cambian e influyen en el cambio de suelo, así como identificar patrones espaciales.

3.5.4 Barredo y Demicheli y el modelo de Lagos, Nigeria (2003)

3.5.4.1 Introducción al modelo.

Barredo y Demicheli plantean un modelo partiendo de la base que, para los planificadores urbanos y regionales, la estimación de los impactos futuros de un plan actual espacial y las políticas del desarrollo del uso de terreno son de gran interés. Las consecuencias de un plan inadecuado en el desarrollo de las grandes ciudades de los países en desarrollo también pueden afectar a la inversión de partes interesadas, por lo que es conveniente desarrollar un modelo que ayude tanto a los desarrolladores urbanos como a los políticos a la hora de tomar decisiones.

Es común creer que, para poder ser sostenible, las zonas urbanas deben mantener un equilibrio interno entre actividad económica, crecimiento de la población, infraestructuras y servicios, polución, ruidos, etc. de forma que el sistema urbano y sus dinámicas evolucionen de forma armónica, limitando de forma interna en la medida de lo posible, los impactos en el medio ambiente. Cómo anticipar, reconocer, medir e interpretar los problemas urbanos y la forma en la que se responde determina la sostenibilidad de un sistema urbano. Qué ocurre cuando los asentamientos humanos, agrupados en grandes zonas urbanas están mal organizados y cómo evitar las consecuencias de un sistema urbano mal organizado son las bases del estudio de Barredo y Demicheli.

Anticipar las consecuencias del desarrollo urbano de ciudades en países en desarrollo es algo difícil, ya que hay reglas complejas que hacen que la



predicción de las dinámicas urbanas se complique. Por ello, Barredo y Demicheli creen que la modelización de sistemas urbanos es una tarea complicada que, sin las herramientas adecuadas, puede ser casi imposible. Además, siempre queda la pregunta de cómo modelar el crecimiento y dinamismo de forma realista.

Para ello, Barredo y Demicheli proponen un enfoque que integra factores de uso del terreno con un enfoque dinámico para modelar casos de predicción sobre el futuro crecimiento de Lagos, Nigeria. Su principal objetivo es predecir el futuro desarrollo del uso del terreno bajo los planes y políticas actuales y poder comparar desarrollos alternativos.

3.5.4.2 El modelo.

El modelo dinámico espacial que proponen utiliza varios factores para simular las variables del uso del terreno desde el enfoque probabilístico. Estos factores son los que impulsan el crecimiento urbano y son, principalmente, áreas libres en la ciudad con buena accesibilidad y las condiciones adecuadas de sostenibilidad que hacen que sean propensas a ser urbanizadas. A la hora de asignar los usos del terreno, el factor de zonificación es bastante influyente ya que es responsable de muchas aplicaciones legales. El proceso de las dinámicas urbanas se puede definir como un sistema probabilístico en el cual la probabilidad de un lugar de una ciudad este ocupado por un tipo de terreno es una función de accesibilidad, idoneidad, zonificación y efecto del vecindario medido para ese lugar. Además, a estos factores se les añade uno más, el factor estocástico, el cual simula el comportamiento no determinista que forma parte del proceso humano de toma de decisiones.

Para conseguir que el sistema funcione de forma no lineal utilizan el efecto iterativo del vecindario. Este efecto está basado en los autómatas celulares básicos en los que el estado de las celdas y las reglas de transición determinan la configuración de las celdas en la siguiente unidad de tiempo.

El modelo utiliza celdas de dimensiones 100 x 100 metros, y cada una puede asumir uno de los veintiún estados posibles. Estos estados se dividen en características fijas, las cuales no participan en las dinámicas, pero si las afectan; funciones pasivas, participan en las dinámicas del uso del suelo, pero son una respuesta a la toma o abandono del suelo por parte de las funciones pasivas; y funciones activas, que son aquellas que fuerzan la demanda de un tipo de terreno y generan el desarrollo urbano.



Características fijas	Funciones pasivas	Funciones activas
Áreas abandonadas	Tierras de cultivo	Zonas residenciales medias
Red de carreteras y ferrocarriles	Áreas de agricultura	Zonas residenciales discontinuas
Aeropuertos	Bosques	Zonas residenciales discontinuas dispersas
Zonas de vegetación	Zonas de pasto	Asentamientos informales
Zonas de agua (lagos, ríos y similares)	Zonas de arbustos o matorral	Zonas industriales
	Zonas de poca vegetación	Zonas comerciales
	Humedales	Servicios públicos y privados
		Zonas portuarias

Cada celda tiene un vector de potenciales que se calcula en función de su idoneidad, accesibilidad, estado de zonificación y efecto del vecindario. Las reglas de transición funcionan con la reasignación de cada celda al estado para el que tengan mayor potencial. Pero, este cambio está sujeto a la limitación de celdas que puede haber en cada estado, el cual debe ser igual a la demanda de esa iteración. La demanda de celdas se genera fuera del modelo de autómatas celulares. Durante cada iteración, todas las celdas se ordenan en función de su potencial, y comienza la transición hasta que cada estado tiene el número de celdas demandadas. Las celdas cambian al estado para el cual tienen el potencial, si cuando es su turno ese estado ya está completo, esa celda no evoluciona de estado.

Barredo y Demicheli utilizan un vecindario circular, con un radio de ocho celdas. Es decir, el vecindario de una celda está compuesto por 197 celdas, las cuales están categorizadas en treinta zonas discretas en función de su distancia a la celda central. El radio del vecindario equivale a una distancia de 0,8 kilómetros, que es similar a la distancia que las personas, generalmente, percibimos e identificamos como vecindario. El efecto del vecindario se calcula para cada estado de las funciones pasivas y activas, y puede ser positivo o repulsivo en función de dicho estado. Las celdas que se encuentren a mayor distancia generan menos efecto.

Por último, cada celda tiene asociada una serie de códigos que representa su estado de zonificación para varios tipos de uso de suelo y en varios periodos. Gracias a la combinación de los efectos de idoneidad, accesibilidad, zonificación y vecindario, cada celda es única en cualidades respecto a posibles usos del terreno. Las demandas del uso del terreno reflejan el crecimiento de una ciudad.

3.5.4.3 Resultados.

Para calibrar el modelo, se simuló el periodo de 1984 – 2000 y se comparó los resultados obtenidos con los datos de referencia. Esta forma de comprobar el modelo es una de las más prácticas. Una vez los resultados fueron satisfactorios, se simula el futuro, suponiendo que los factores de calibración permanecerán estables durante el periodo estudiado.

Para el estudio de futuros escenarios, la superficie y demandas del tipo de uso se definieron en base a las tendencias de población y actividades económicas. El factor de zonificación de los tipos de suelo se obtuvo a partir del Plan Regional del Estado de Lagos desarrollado a finales de los años 70. Aunque tuvieron problemas, ya que la zona norte de la ciudad ha ido creciendo fuera del área considerada en el Plan y, como consecuencia, esa área no está considerada en el factor de zonificación.

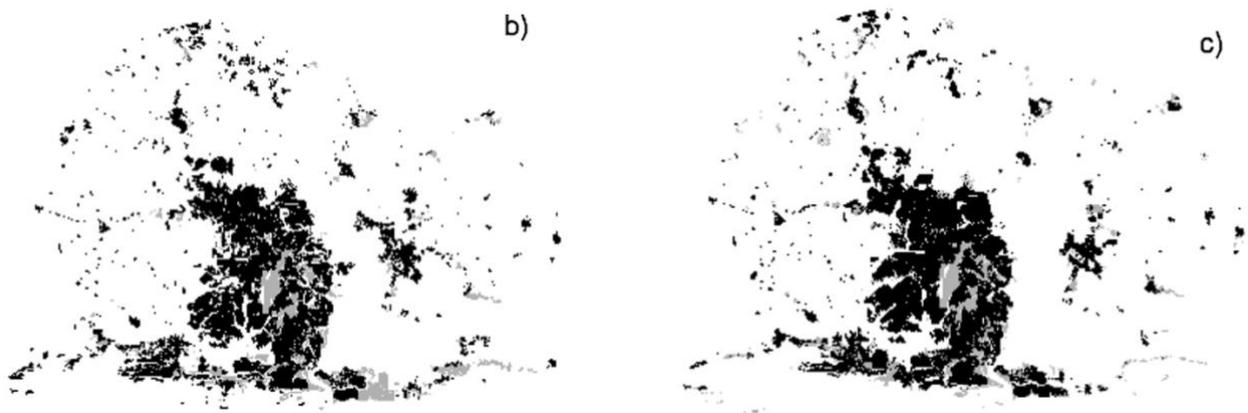


Figura 3.11 A la izquierda el mapa de Lagos en el año 2000. A la derecha el mapa obtenido para el año 2000 usando el modelo de Barredo y Demicheli.

Mediante la comparación visual se observa que los resultados del modelo son bastante buenos. Aunque hay algunas diferencias, los patrones de distribución del uso de los terrenos son muy similares de los reales en la ciudad.

Barredo y Demicheli comentan el problema de usar matrices de coincidencia para analizar los modelos de autómatas celulares. Destacan que estas matrices identifican como discordancia el desplazamiento de las celdas, pero que se identifica como discordancia un desplazamiento pequeño que uno grande, lo que provoca resultados no reales.

Para analizar los resultados utilizaron, además, una serie de métricas espaciales que compararon entre el mapa real y el simulado. Gracias a estos datos espaciales pudieron comparar la composición de la ciudad. Estos datos los obtuvieron analizando los mapas rasterizados mediante el software Fragstat. Este análisis mostró un buen grado de similaridad entre ambos



mapas en función de aspectos como configuración, patrones y subdivisión de áreas. Los valores del análisis significan que la simulación reproduce de una forma precisa los patrones espaciales para los usos del terreno evaluados.

Una vez calibrado y analizado el modelo, lo utilizaron para simular el crecimiento y desarrollo de Lagos en el periodo 2000 – 2020. Las demandas del tipo de uso del terreno las calcularon en función de las tendencias de las décadas pasadas.

Considerando las dinámicas y tendencias, pudieron prever que habría un importante crecimiento en los 20 años estudiados. De forma general, se puede decir que el desarrollo simulado de la ciudad ha ocurrido de forma esperada. El desarrollo más importante se da en la zona norte y este, ya que el sur y oeste están limitados por la presencia de zonas de agua.

3.5.4.4 Conclusiones.

Las conclusiones a las que llegaron Barredo y Demicheli fueron que el crecimiento proyectado para Lagos en 2020 era una consecuencia directa del aumento de población. Esto conlleva que, si no se toman medidas y acciones efectivas, las consecuencias sobre la calidad de vida podrían ser dramáticas, ya que esta ciudad es una de las ciudades más sucias del mundo y las autoridades tenían serios problemas a la hora de lidiar con el tratamiento de aguas residuales. Un problema añadido es que la ciudad crece muy rápido y de forma descontrolada.

Gracias al modelo generado, se pueden estudiar distintas estrategias de crecimiento y políticas urbanas para tratar de minimizar los efectos del crecimiento de la ciudad. Gracias a que los modelos de autómatas celulares son capaces de reproducir los procesos urbanos, se pueden analizar varios “what if” escenarios.

3.5.5 Liu y el modelo de Sídney (2009)

3.5.5.1 Introducción al modelo.

Como comenta Liu, Sídney, desde 1789 hasta la actualidad, ha pasado de ser una colonia penal a una de las mayores ciudades del mundo. La ciudad está en constante desarrollo, por lo que entender cómo ha evolucionado en el pasado e intentar prever como lo hará en el futuro es uno de los grandes objetivos de los geógrafos y planificadores urbanos.

Para el desarrollo del modelo se ha decidido utilizar un modelo basado en autómatas celulares.



Los datos geográficos utilizados para poder generar un sistema de información y analizar los cambios espaciotemporales del área urbana se obtuvieron a través de distintas agencias y entre ellas estaban Geoscience Australia y Australia Bureau of Statistics. Se emplearon técnicas GIS para procesar los datos y verificar su calidad y consistencia.

Para los datos topográficos se utilizó Geodata Topo-250k desarrollado por Australian Surveying and Land Information Group. En este paquete de información se incluye un vector de representación que incluye: redes de drenaje, lagos, humedales, características de las costas, datos de infraestructuras como redes de carreteras y ferrocarriles, y localidades y áreas urbanas. Del Australia Bureau of Statistics también se obtuvieron los datos relativos al censo de población de la ciudad.

En la modelización se excluyeron dos tipos de terrenos. El primer tipo son las áreas que se considera que no pueden ser urbanizables como zonas de agua, parques naturales, reservas de agua o centros de conservación natural. El otro tipo son zonas reservadas por el gobierno para otros propósitos como cementerios, aeródromos o áreas militares.

3.5.5.2 El modelo.

Para definir el modelo, las celdas empleadas son de 250 x 250 m. Además, como se usó el enfoque del conjunto difuso, el estado de las celdas se representa por el valor de su membresía en el conjunto urbano difuso. Una membresía completa se representa mediante el valor 1, lo que indica que el terreno es urbano. Por el contrario, si el valor es 0, el terreno no es urbano. Las celdas que presentan valores comprendidos entre 0 y 1, tienen una membresía parcial, lo que se traduce en un estado urbano parcial que será mayor cuanto más cercano al 1 sea su valor.

El vecindario que se utilizó es circular con un radio de dos celdas, equivalente a 0,5 kilómetros.

El desarrollo urbano es el resultado de la combinación de fuerzas internas y externas. Internamente, el área tiende a continuar su desarrollo una vez ha empezado a cambiar de rural a urbana, especialmente si este cambio está acompañado por el desarrollo de su vecindario. Externamente, factores como las condiciones geográficas, socioeconómicas y los controles y políticas institucionales pueden tener un impacto en este desarrollo. Los límites físicos, como zonas de agua o terrenos abruptos, pueden restringir o ralentizar el proceso urbano. Los factores socioeconómicos como la disponibilidad del terreno, la demanda de este, la accesibilidad a zonas de empleo y otros



servicios, como colegios, tiendas o transporte público juegan papeles muy importantes en el crecimiento urbano.

El impacto que tienen los planes de urbanismo se puede reflejar de dos maneras. La primera es en forma de factor acelerante promoviendo el desarrollo en áreas en las que estaba planeando o proponiendo áreas para su desarrollo. La otra forma es como un factor global que puede acelerar o limitar el desarrollo de las celdas dentro de una región.

3.5.5.3 Resultados.

La calibración es el proceso de verificación por el cual se comprueba que un sistema está funcionando como debería.

El modelo de Liu se calibró usando un enfoque de predicción retrospectiva. Es decir, se simuló un periodo pasado del que se tienen datos y se compararon ambos modelos, el real y el simulado.

Para esta calibración se empleó la comparación en tres formas: visualmente, estadísticamente y a lo largo del tiempo. La calibración visual es muy útil como primera calibración, ya que ayuda a corregir los parámetros de forma rápida, además de servir como comprobación de que el modelo está replicando los patrones espaciales del desarrollo histórico. En la calibración estadística se empleó el enfoque de la matriz de error. Ésta recoge la información del modelo real y del simulado y compara ambas celda a celda. Este enfoque es muy efectivo al representar la precisión tanto a nivel global del modelo como por tipos de suelo. El problema de este enfoque es que como compara celda a celda, no captura correctamente la calidad de la similaridad de patrones.

El modelo tiene soporte GIS ya que gracias a estas herramientas se tiene un amplio rango de funcionalidad de análisis espacial y de visualización gráfica. Los modelos basados en autómatas celulares necesitan usar varias fuentes de información, como mapas históricos del uso del terreno, datos de censo o imágenes satélite y, gracias al uso de programas GIS, el procesamiento, análisis e integración de estos datos es mucho más sencillo. En este modelo se usó un enfoque de acoplamiento fuerte ya que los datos se procesaban y almacenaban en ArcGIS y los datos de la simulación también se almacenaban en dicho programa. Como no era necesario la conversión de datos entre el modelo y GIS, se ahorró mucho tiempo de comunicación de datos.



Figura 3.12 A la izquierda los mapas reales de Sídney en 1986, 1996 y 2006. A la derecha los mapas simulados en 1986, 1996 y 2006.



3.5.5.4 Conclusiones.

Cómo se puede observar los patrones del desarrollo urbano generados por el modelo son muy similares a los patrones seguidos por la ciudad. En base a esto, y dando por buena la calibración y el modelo, se generó una simulación hasta el año 2031.

Este modelo y esta simulación persiguen poder entender y ayudar a proyectar el futuro de la ciudad, analizando factores que pueden afectar el correcto desarrollo de la ciudad.

Tras el análisis, Liu concluye que a ciudad va a seguir desarrollándose, rellenando las áreas urbanas y expandiéndose hacia el oeste, suroeste y noroeste. Este desarrollo se verá afectado por el vecindario y la red de transporte, pero también tendrá un gran peso las limitaciones topográficas. El control del plan urbanístico será fundamental en este proceso de expansión, que se podrá descontrolar si no se controla de forma eficiente.

3.5.6 Hewitt, Hernández-Jiménez y Escobar y el modelo de Doñana (2012)

3.5.6.1 Introducción al modelo.

Este modelo forma parte del proyecto DUSPANAC. Este proyecto busca la modelización de las dinámicas de usos del suelo en la red de Parques Nacionales Españoles y su entorno para poder analizar y prever los cambios que se producen en estos espacios como consecuencia de las actividades humanas, el cambio climático y la dinámica de los ecosistemas.

Doñana es una zona en la que conviven dos enfoques: el desarrollo y la conservación. Como destacan los autores, el desarrollo económico social de la zona se ha basado en el turismo y en la agricultura, lo que consiguió que, en los últimos sesenta años, el área de Doñana pasará de ser una de las zonas más pobres a tener un nivel de renta superior a la media española. Mientras se producía este desarrollo económico, aumentaba el reconocimiento de la zona como espacio natural, lo que se traducía en un incremento de las medidas dirigidas a su protección. Estas medidas hacían que las áreas limítrofes se fueran degradando como consecuencia de un modelo de gestión que entiende que el desarrollo y la conservación deben ir enfrentados.

Los autores tienen como objetivo mostrar la herramienta potente que es la modelización dinámica espacial. Para ello usan un modelo de autómatas celulares con un proceso participativo. Gracias al modelo de autómatas celulares consiguen representar la toma de decisiones complejas, mientras que con el proceso participativo garantizan la dimensión humana del proceso de toma de decisión.



Los autores persiguen desarrollar una serie de escenarios futuros, expresándolos mediante mapas de usos del suelo, a través de los cuales intentan simular las dinámicas de cambio en el territorio.

Para la modelización de escenarios se desarrollan dos etapas. En la primera se crean los escenarios en base a lo que se pretende estudiar en los acontecimientos futuros. En la segunda, estos escenarios se incorporan en el modelo dinámico.

Como se ha mencionado, en este modelo también se utilizó el proceso participativo. Con esta metodología se pretende que los agentes concedores de Doñana participen en el proceso de modelización, logrando su implicación e incorporación de su conocimiento. Para esto, el proyecto DUSPANAC aplicó el proceso participativo de la manera más amplia posible. La intervención de los agentes consiste en la identificación y definición de las dinámicas que se debían modelar, así como los parámetros que deberían ser incluidos en el modelo para poder representar dichas dinámicas.

3.5.6.2 El modelo.

Este modelo fue realizado usando el software Metronamica, el cual, a partir de un mapa inicial en formato ráster en que cada célula tiene un uso del suelo, determina el futuro uso del suelo por la susceptibilidad de cada célula para tomar otro valor. Por lo tanto, para cada paso del modelo es necesario calcular el potencial de transición, es decir, el potencial de cada célula de cambiar de una categoría a otra. Hay cuatro variables que determinan ese potencial que son:

- Aptitud: son las condiciones físicas de cada célula para ser ocupadas por una determinada categoría.
- Zonificación: el nivel de protección para ciertas áreas de valor natural.
- Accesibilidad: la proximidad a las principales vías de comunicación y su cualidad para cumplir los requerimientos de movilidad de las actividades categorías de ocupación.
- Dinámicas de vecindad: el comportamiento de las células que rodean a una célula específica.

Además, este potencial tiene aplicado un parámetro estocástico para evitar el sobre determinismo.

La cantidad total de células que pueden cambiar de un estado a otro se controla a través de la demanda, la cual se determina mediante factores externos al modelo. En la zona de estudio, para calcular la demanda se estudiaron factores como el cambio climático (altas temperaturas y escasez de agua) o el aumento de la rentabilidad de algunos cultivos.

El desarrollo de los escenarios futuros se realizó de forma no lineal a través de la calibración y experimentación. Así, los escenarios experimentales o “pilotos” tratan de representar las dinámicas observadas a través de análisis



previos de cambios de usos del suelo. Gracias a los talleres participativos, junto a los agentes se investigaron estas dinámicas y se establecieron los parámetros adecuados para la modelización del entorno.

Para el proceso participativo se utilizó la metodología de la Investigación Acción Participativa (IAP), el cual es un enfoque de reconocida aplicabilidad en el desarrollo rural y la gestión de recursos naturales. A partir de un proceso inicial de identificación de los agentes locales más adecuados, se celebran una serie de talleres participativos con el objetivo de informar sobre el modelo y de, a su vez, recopilar información clave de los agentes para la parametrización de este. Una de las actividades más importantes es la recogida de opiniones sobre los cambios de usos del suelo de la zona que se han observado a partir de los estudios realizados con anterioridad.

Una vez se calibró el modelo, los investigadores procedieron a la elaboración de los futuros escenarios. Para este proceso se basaron en tres “storylines” muy simples, ya que el objetivo era proyectar las características más destacadas del espacio natural a grandes rasgos. Estos escenarios fueron los siguientes:

1. Bussines as usual. Este escenario se considera la base para simular a 30 años vista. Es la continuación de las tendencias observadas a partir de los datos de 1990 a 2006. La creación de este escenario permite conocer las posibles futuras consecuencias sobre el territorio del paso del tiempo con las tendencias actúales además de identificar las áreas más sensibles a estos cambios.
2. Ampliación de núcleos urbanos e infraestructuras turísticas. Este escenario representa la ampliación urbanística alrededor de los núcleos urbanos actúales junto con el desarrollo de zonas e infraestructuras de ocio y uso turístico.
3. Expansión masiva de frutales. Este escenario es el más extremo y analiza que ocurriría si aumentase la rentabilidad de los cultivos de fruta roja y cítricos. Este tipo de escenarios es muy útil para conocer los posibles impactos de cambios en un futuro.

3.5.6.3 Resultados.

En el modelo se observan que los usos que más cambian son los pastizales naturales, cultivos en regadío y en secano y la vegetación esclerófila. Así como se aprecia una expansión de los frutales (cultivo intensivo de cítricos y fresas). El aumento de algunos tipos de suelo conlleva la disminución de otros, como la vegetación esclerófila o los matorrales. Pero, como resultado, se obtiene que, fuera de los límites del parque natural, se produce un aumento de la actividad agrícola.

Gracias al análisis participativo los investigadores reconocen haber sido capaces de identificar las causas y factores de cambio de una amplia serie de procesos que desconocían. Además, los agentes comentaron que algunas

dinámicas representadas en la cartografía, como el aumento de cultivos de regadío, no ajustaban de forma real la superficie.

Como se observa en los mapas obtenidos en las simulaciones, en el escenario 1 se produce una ampliación del suelo urbano, así como de las instalaciones deportivas y recreativas de las áreas limítrofes del parque. En los escenarios 2 y 3 se exploran situaciones más extremas y así son los resultados obtenidos, como la presión urbanística y los cultivos en regadío.

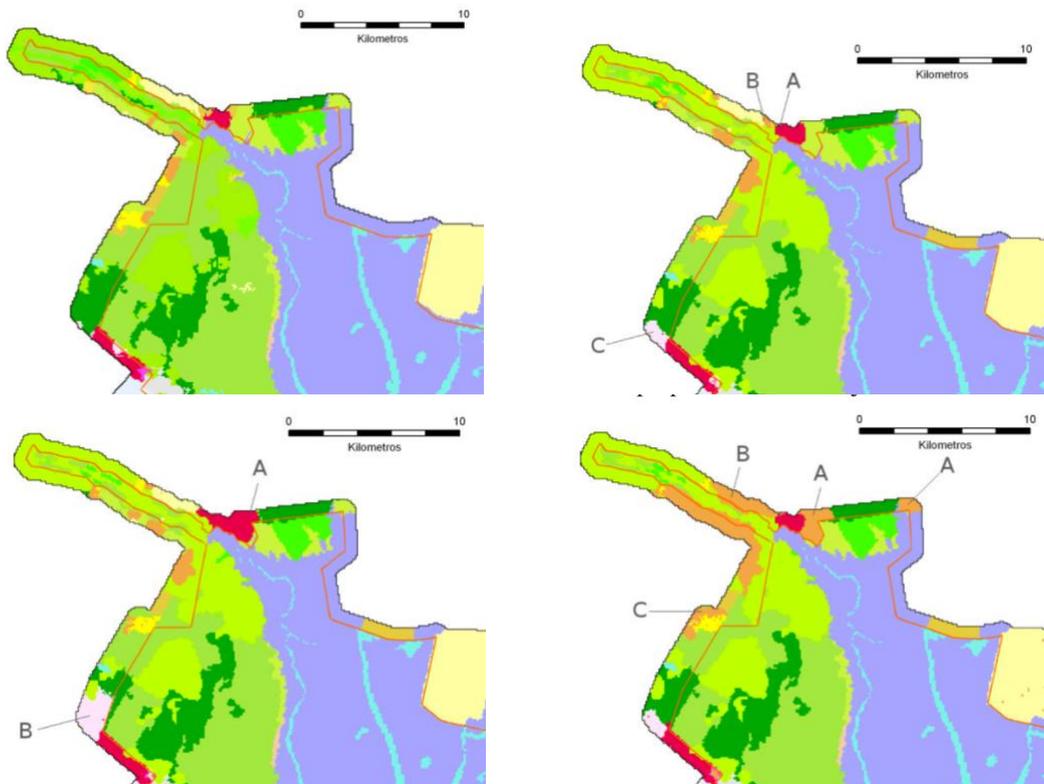


Figura 3.13 Izquierda arriba: Norte del área de estudio en 2006. Derecha arriba: Escenario 1 bussines as usual en 2030. Izquierda abajo: Escenario 2 ampliación de núcleos urbanos e infraestructuras turísticas en 2030. Derecha abajo: expansión masiva de frutales en 2030. A: ocupación de pastizal por suelo urbano. B: ampliación de instalaciones deportivas asociadas al turismo. C: ampliación del área de cultivo de frutales

3.5.6.4 Conclusiones.

De este modelo, los investigadores sacaron varias conclusiones como la necesidad de ampliar la zona de estudio, ya que los procesos de cambio de los usos del suelo que afectaban al parque natural comprendían una zona mucho más extensa. Otra conclusión que obtuvieron fue que, debido a los elementos de protección del parque de Doñana, no había una explotación más intensiva de la actual de los usos del suelo.

La combinación de los procesos participativos con tareas analíticas-técnicas para la elaboración de un modelo proporciona una oportunidad de estudiar el territorio desde el punto de vista de las dinámicas de cambio.

Modelo	Enfoque	Tamaño celdas	Vecindario	Estado del suelo	Transición	
Dublín (2003)	Autómatas celulares limitados.	100 x 100 metros.	Circular con radio de 8 celdas (0,8 km).	22 estados en 3 categorías: fijo, pasivo y activo.	Vector de potencialidad en función del vecindario, idoneidad, zonificación y accesibilidad.	
LeefOmgevingsVerkenner (2002)	Autómatas celulares con un modelo regional de interacción espacial.	500 x 500 metros.	Circular con radio de 8 celdas.	16 estados en 3 categorías: fijo, pasivo y activo.	Vector de potencialidad en función del vecindario, idoneidad, zonificación y accesibilidad.	La demanda se calcula y ajusta la densidad en cada interacción con el modelo vinculado.
Songjiang (2016)	Autómatas celulares con enfoque PLS.		Vecindario de Moore (3x3).		En función de distancia, vecindario y limitaciones físicas.	Uso de algoritmos: recorrido simulado, algoritmo genético y optimización por enjambre de partículas.
Lagos (2003)	Autómatas celulares con enfoque probabilístico.	100 x 100 metros.	Circular con radio de 8 celdas (0,8 km).	21 estados en 3 categorías: fijo, pasivo y activo.	Vector de potencialidad en función del vecindario, idoneidad, zonificación y accesibilidad.	Uso de tendencias de la población y economía para simulación a futuro.
Sídney (2009)	Autómatas celulares con enfoque de conjunto difuso.	250 x 250 metros.	Circular con radio de 2 celdas (0,5 km).		Mediante membresía. Factores externos e internos.	Uso de datos GIS.
Doñana (2012)	Autómatas celulares con enfoque participativo.				En función de aptitud, zonificación, accesibilidad y dinámicas. La demanda en función de factores externos.	Simulación de 3 posibles escenarios.



4. Aplicación

En este apartado se realiza una simulación de la evolución del uso del suelo en Cantabria.

4.1 Hewitt, Díaz Pacheco y Moya Gómez y el modelo Simlander (2013)

El nombre de Simlander viene de “SIMulation of LAnd use changE using R” y es un prototipo de un modelo basado en autómatas celulares para el uso del terreno en el programa “R”. En su descripción, los autores indican que más que un sistema, es una colección de comandos en R convertidos en un código que permiten modelar sistemas de autómatas celulares.

4.2 Aplicación del modelo.

Para la aplicación del modelo se ha modificado el código y estudiado los resultados obtenidos para el uso del suelo en Cantabria.

La obtención de los datos del uso del suelo ha sido a través del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Para ello se han descargado los mapas con la información requerida en formato ráster. Los datos descargados pertenecen al Copernicus Land Monitoring Land Service (CORINE Land Cover) con un tamaño de pixel (celda) de 500x500 metros.

Los primeros pasos consisten en la preparación de los datos para que el modelo Simlander pueda leer los datos. Dentro de este proceso, uno de los más importantes consiste en la reclasificación de los datos. CORINE Land Cover utiliza 44 categorías diferentes, mientras que Simlander utiliza 7 categorías.

CORINE Land Cover						R	Simlander		
Level 1		Level 2		Level 3		Values	Values		
Code	Title	Code	Title	Code	Title				
1	Artificial Surfaces	1.1	Urban fabric	1.1.1	Continuous urban fabric	1	5		
				1.1.2	Discontinuous urban fabric	2	5		
				1.2.1	Industrial or commercial units	3	6		
		1.2	Industrial, commercial and transport units	1.2.2	Road and trail networks and associates land	4	6		
				1.2.3	Port areas	5	6		
				1.2.4	Airports	6	6		
				1.3.1	Mineral extraction sites	7	6		
		1.3	Mine, dump and construction sites	1.3.2	Dump sites	8	6		
				1.3.3	Construction sites	9	6		
		1.4	Artificial, non-agricultural vegetated areas	1.4.1	Green urban areas	10	5		
				1.4.2	Sport and leisure facilities	11	5		
		2	Agricultural Areas	2.1	Arable land	2.1.1	Non-irrigated arable land	12	3
						2.1.2	Permanently irrigated land	13	3
						2.1.3	Rice fields	14	3
2.2	Permanent crops			2.2.1	Vineyards	15	2		
				2.2.2	Fruit trees and berry plantations	16	2		
2.3	Pastures			2.2.3	Olive groves	17	2		
				2.3.1	Pastures	18	1		
2.4	Heterogeneous agricultural areas			2.4.1	Annual crops associated with permanent crops	19	2		
				2.4.2	Complex cultivation patterns	20	2		
				2.4.3	Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation	21	2		
				2.4.4	Agro-forestry areas	22	2		
3	Forest and Seminalural Areas			3.1	Forests	3.1.1	Broad-leaved forest	23	4
						3.1.2	Coniferous forest	24	4
						3.1.3	Mixed forest	25	4
		3.2	Scrub and/or herbaceous associations	3.2.1	Natural grassland	26	1		
				3.2.2	Moors and hearthland	27	1		
				3.2.3	Sclerophyllous vegetation	28	1		
				3.2.4	Transitional woodland-scrub	29	1		
		3.3	Open spaces with little or no vegetation	3.3.1	Beaches, dunes and sand	30	1		
				3.3.2	Bare rocks	31	1		
				3.3.3	Sparsely vegetated areas	32	1		
				3.3.4	Burnt areas	33	1		
				3.3.5	Glaciers and perpetual snow	34	1		
				4.1	Inland wetlands	4.1.1	Inland marshes	35	1
						4.1.2	Peat bogs	36	1
4.2	Marine wetlands	4.2.1	Salt marshes	37	1				
		4.2.2	Salines	38	1				
		4.2.3	Intertidal flats	39	1				
5	Water Bodies	5.1	Inland waters	5.1.1	Water courses	40	7		
				5.1.2	Water bodies	41	7		
		5.2	Marine waters	5.2.1	Coastal lagoons	42	7		
				5.2.2	Estuaries	43	7		
				5.2.3	Sea and ocean	44	7		

Tabla 4.1 Categorías del uso del suelo de CORINE Land Cover con sus valores en R y en Simlander.



En Simlander se trabajan con 7 categorías del suelo, que son las siguientes:

1. Tierras vacías.
2. Cultivos de secano.
3. Cultivos intensivos.
4. Bosques.
5. Urbano.
6. Infraestructuras y zonas mineras.
7. Agua.

En función de la categoría a la que pertenecen nuestros datos se les ha asignado un valor correspondiente a las categorías de Simlander, según la tabla 4.1.

Esta asignación se ha realizado mediante una matriz en R. Se ha definido una matriz de dos columnas, una con los valores del CORINE Land Cover y otra con el valor que le corresponde a cada uno de los anteriores según Simlander.

```
mat_rec <- matrix(c(1,5, 2,5, 3,6, 4,6, 5,6, 6,6,
7,6, 8,6, 9,6, 10,5, 11,5, 12,3, 13,3, 14,3, 15,2,
16,2, 17,2, 18,1, 19,2, 20,2, 21,2, 22,2, 23,4,
24,4, 25,4, 26,1, 27,1, 28,1, 29,1, 30,1, 31,1,
32,1, 33,1, 34,1, 35,1, 36,1, 37,1, 38,1, 39,1,
40,7, 41,7, 42,7, 43,7, 44,7), ncol=2, byrow=TRUE)
```

Una vez definida la matriz de reclasificación, se utiliza la función “reclassify” y ya tendríamos los datos según los requerimientos del modelo.

A continuación, se ha procedido a la extracción del uso urbano de los mapas de usos de suelo. De las siete categorías de uso del suelo que tenemos, realmente sólo nos interesa la correspondiente al suelo urbano. Por ello, creamos un mapa únicamente de suelo urbano mediante el mismo proceso de reclasificación explicado anteriormente. La diferencia es que, en esta ocasión, vamos a convertir todas a las categorías a valor 0, excepto la categoría de suelo urbano, que tendrá valor 1.

Además, hay categorías que sabemos que es imposible, o muy improbable, que en algún momento evolucionen a suelo urbano, como es el caso del suelo clasificado como agua o como infraestructuras. Por lo tanto, igual que para el suelo urbano, generamos otro mapa, pero con todas las categorías con valor 0, menos las categorías de infraestructuras y zonas mineras y agua, que ponemos que no tienen datos mediante el comando NA.

Para unir los dos mapas, usamos la función “mask”, que lo que hace es fusiona ambos mapas, por lo que el resultado es un mapa en el que las celdas tienen tres posibles valores:



- 0. Los suelos no clasificados como urbanos y que podrían ser urbanos.
- 1. Suelos urbanos.
- NA. Suelos que nunca van a tener la categoría de suelo urbano.

Lo siguiente que hacemos es definir la influencia del vecindario. Hemos decidido utilizar un vecindario circular de radio igual a dos celdas. Las celdas de vecindad son aquellos píxeles próximos a los que estamos estudiando (en este caso, aquellos con categoría de suelo urbano) y que tienen altas probabilidades de cambiar de categoría por proximidad. Para definir estas celdas de vecindad vamos a usar una matriz de 5x5 de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 50 & 0 & 0 \\ 0 & 50 & 50 & 50 & 0 \\ 50 & 50 & 500 & 50 & 50 \\ 0 & 50 & 50 & 50 & 0 \\ 0 & 0 & 50 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Al definir la matriz así, el vecindario se asemeja a una circunferencia.

Además, se ha definido un factor estocástico. Esto sirve para añadir cierta aleatoriedad al modelo cuando realizamos la simulación, ya que, si no lo añadimos, todas las simulaciones que hagamos van a ser iguales. Por lo tanto, este factor es para que los resultados sean coherentes, ya que podemos intentar prever como van a crecer las ciudades, pero depende de muchos factores que no estamos teniendo en cuenta, como el número de nuevos habitantes que van a ir a la ciudad, la accesibilidad a la red de transporte, mapa de elevaciones, la creación de nuevas infraestructuras, ...

Para definir el factor estocástico, primero se define una función que genera valores aleatorios entre 0 y 1. Para distribuir estos valores por el mapa de forma aleatoria vamos a usar una función Weibull, que definimos de la siguiente forma:

```
x <-runif(ncell(T1))
weibull <- 1+(-log(1-(x))) *exp (1/2)
```

Por último, se genera el potencial de transición. Los píxeles (o celdas) con mayor potencial de transición son aquellos que tienen la mayor probabilidad de cambiar a suelo urbano, es decir, de pasar de valor 0 a valor 1. El potencial de transición para una unidad de tiempo lo definimos como:

```
model_TTP <- (model_nhood+1) *(model_random)
fun <- function(x) {x[is.na(x)] <- 0; return(x)}
TTP <- calc (model_TTP, fun)
```



La función `model_TTP` es la definición del potencial de transición, siendo $(\text{model_nhood} + 1)$ la probabilidad de transición en función del vecindario y (model_random) la influencia del factor estocástico.

La función `fun` sirve para eliminar los valores NA, es decir, aquellos pixeles donde hemos dicho que no hay datos.

Y, por último, `TTP` es el resultado del potencial de transición, es la misma función que `model_ttp`, pero eliminando las celdas NA.

Lo último que queda por realizar es saber la demanda de suelo urbano. Es decir, saber cuántas celdas deben transicionar de un estado a otro en función del potencial. Para saber la demanda, lo vamos a hacer en función de los datos que tenemos. Como para el primer análisis hemos usado los datos del año 2012 y 2018, lo que hemos hecho ha sido obtener el número de celdas de valor 1 para ambos años y obtener, de forma lineal, cuantas se han añadido por año. En este caso, en el año 2012 había 6537 celdas de suelo urbano, y en el 2018, 6564. Si restamos los valores, obtenemos un aumento de 27 celdas de suelo urbano, y si dividimos entre el número de años que han pasado (6), obtenemos que por año ha habido 4 celdas nuevas de suelo urbano. De esta forma obtenemos la demanda anual.

4.3 Resultados del modelo.

Se han usado los datos del uso del suelo del año 2012 y se ha generado la simulación de su evolución hasta el año de 2018, ya que es el último año del que se tienen datos. El código completo se encuentra en el Anexo 1.

El mapa generado es el siguiente:

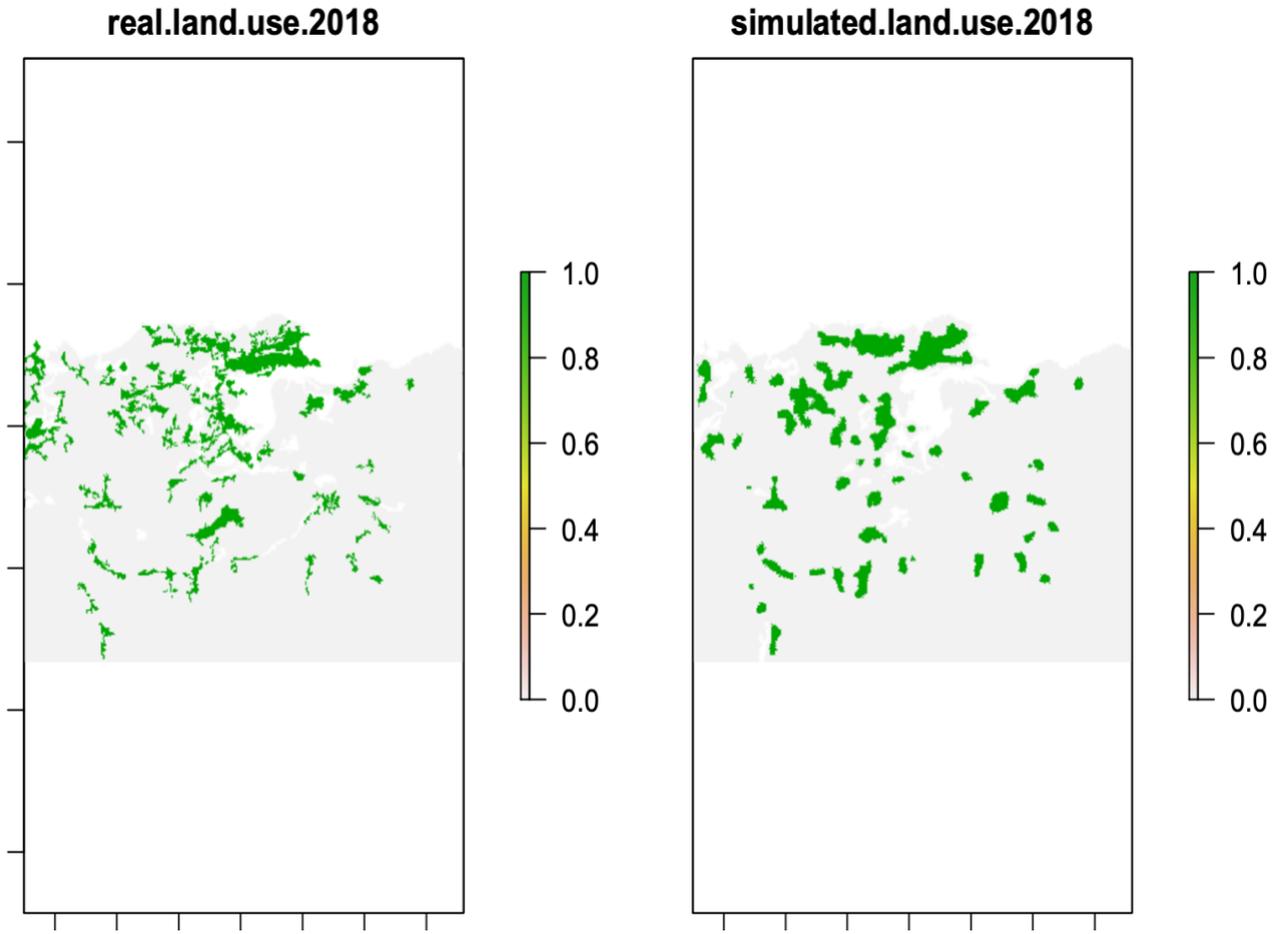


Figura 4.1 Resultados obtenidos.



LUCÍA FERNÁNDEZ GUTIÉRREZ

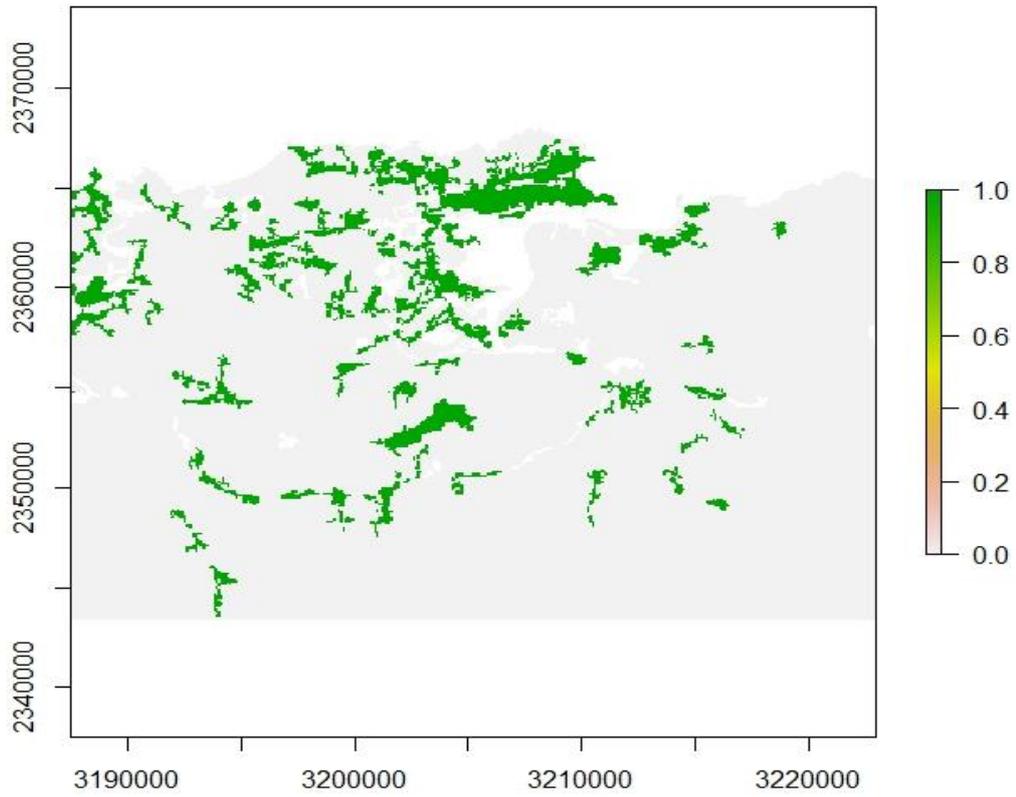


Figura 4.2 Mapa real del uso del suelo en 2018.

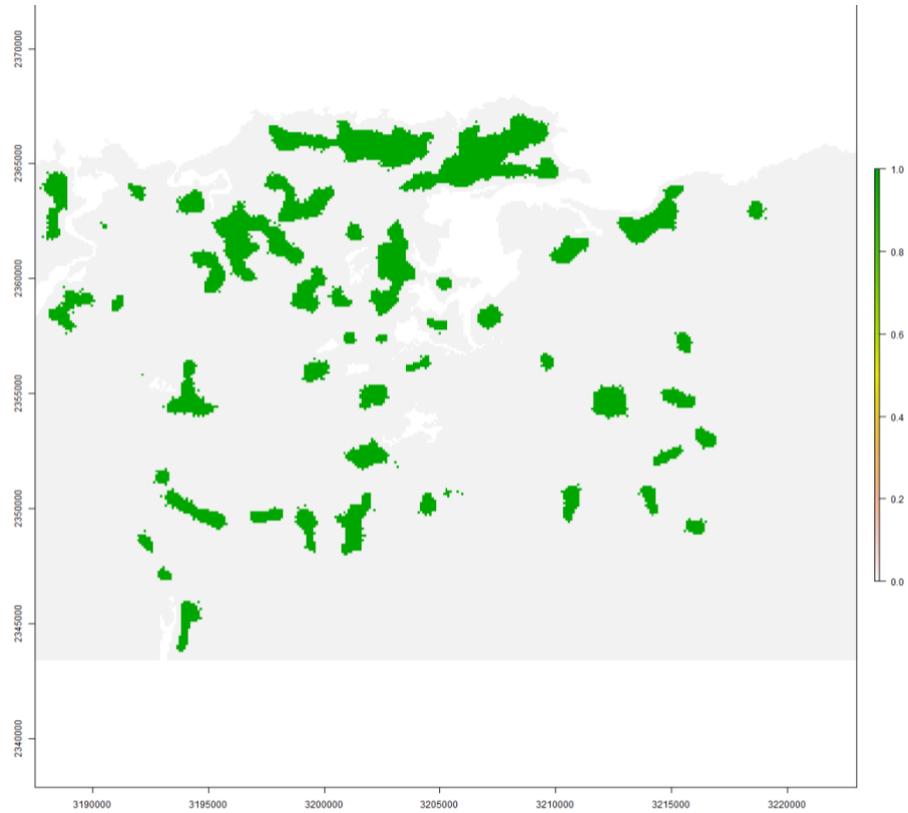


Figura 4.3 Mapa generado del uso del suelo en 2018.



Como se puede observar, el mapa generado se corresponde bastante con la realidad.

La simulación del uso del suelo generada tiene similitud con la realidad. Es cierto que los datos obtenidos no son tan precisos como los datos reales. Pero esto se debe a que sólo se ha usado una fuente de datos. Es decir, toda la simulación es en función del estado del suelo en el año de 2012.

Los resultados mejorarían bastante si, además del uso del suelo, usáramos otras fuentes de datos que influyen en la evolución del suelo, como es la red de transportes y la accesibilidad a esta, las pendientes y elevaciones del terreno, así como otros datos del terreno (parques naturales, zonas inundables, ...).

Con un mapa de accesibilidad, generado a partir de la red de carreteras podríamos obtener mejores resultados. Para obtener este mapa, partimos de la red de carreteras, de donde generamos un mapa de distancia. A cada píxel se le asignaría un valor en función de su distancia a una carretera. A menor distancia, mayor accesibilidad, por lo que las probabilidades de este píxel para cambiar de estado aumentarían. En vez de generar el mapa de accesibilidad mediante una reclasificación, se puede usar la ecuación de White de accesibilidad local:

$$\alpha_j \left(1 + \frac{D}{c_j} \right)$$

D es la distancia de una celda a la red de transportes.

C_j es un coeficiente que expresa la importancia de la accesibilidad para las celdas de uso del suelo. Generamos este coeficiente de accesibilidad para controlar el efecto de dicha accesibilidad, cuanto mayor sea, más débil será la atracción a las carreteras u la accesibilidad estará más expandida por el área de estudio, y cuanto menor sea, al contrario, más fuerte y concentrada será la atracción.

A partir del mapa de pendientes o elevaciones se puede generar un mapa de idoneidad. Esto se hace mediante una reclasificación, a menor pendiente mayor idoneidad del terreno para desarrollar suelo urbano.

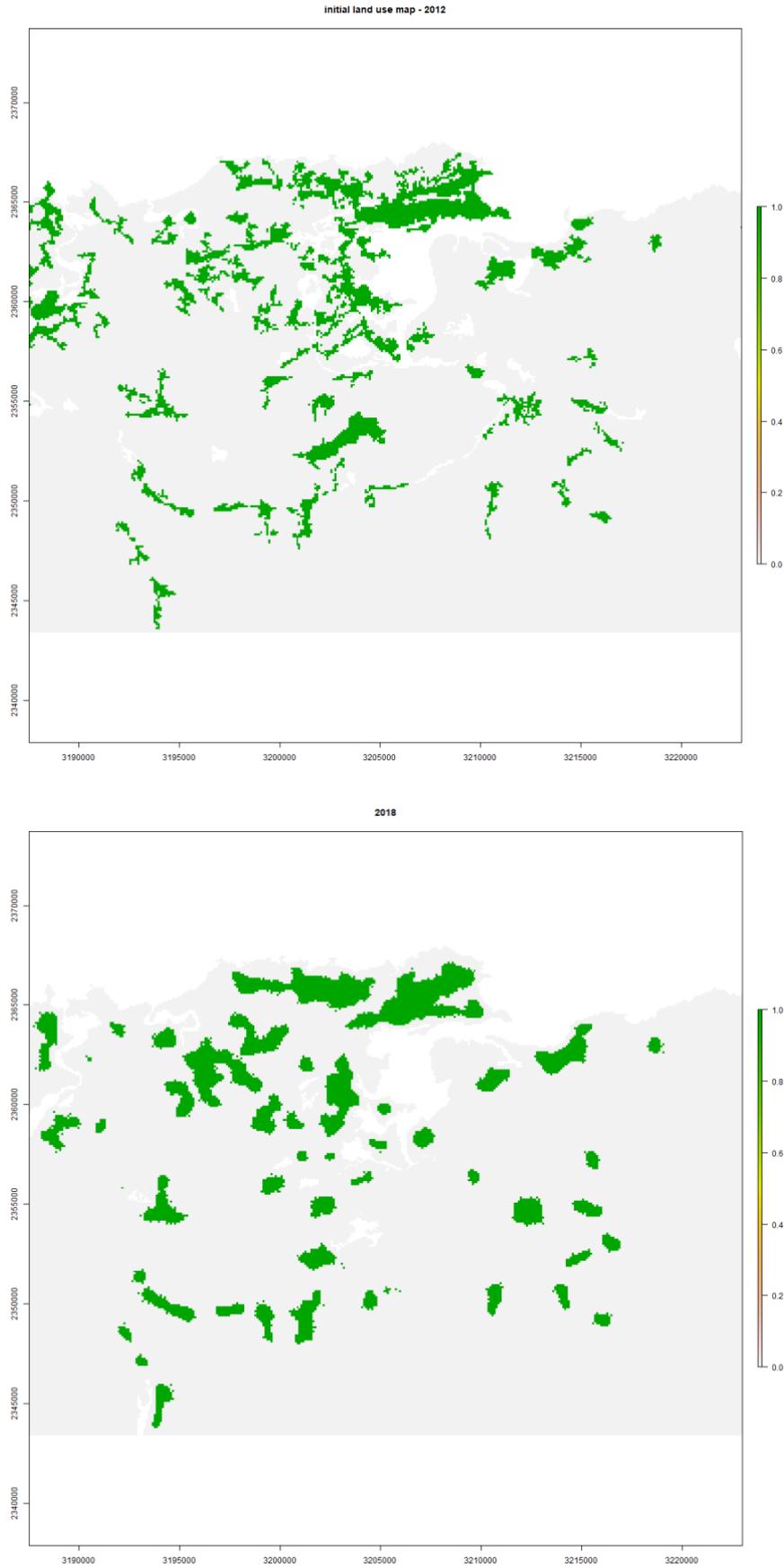


Figura 4.4 Arriba mapa real en 2012. Abajo, mapa generado en 2018.

Si comparamos el mapa de datos inicial (2012) con el generado (2018) podemos observar que los núcleos de población se mantienen y que, tras los 6 años de periodo, la mayoría aumenta su tamaño.

Es cierto que, si nos fijamos, algunas poblaciones cercanas a la costa vemos de que dejan de ser suelo urbano. Esto puede deberse a que, como se ha mencionado al principio, los suelos categorizados como infraestructuras y zonas de agua se consideran no urbanizables. Por lo que, por la influencia del vecindario, el tamaño de celda y esta premisa, las zonas urbanas en los alrededores de los puertos y zonas muy cercanas a la costa (como puede ser el entorno de la Playa del Sardinero en Santander aparece en gris, es decir, no urbano).

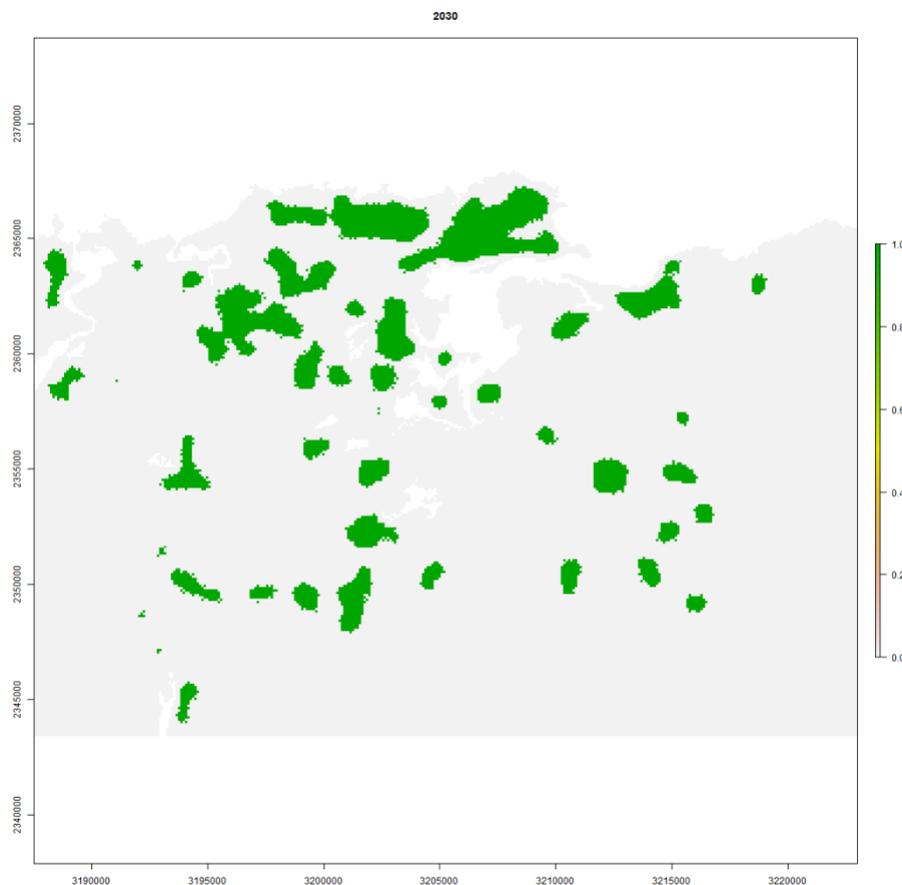


Figura 4.5 Mapa simulado del uso del suelo en 2030 para Cantabria.

En este último mapa se ha hecho una simulación de cómo sería el suelo urbano en 2030 a partir de los datos del año 2018.

Podemos ver que los núcleos de población siguen aumentando y, visualmente, es un resultado coherente. A partir de esta simulación se podrían tomar



medidas y acciones. Por ejemplo, vemos que Santander sigue creciendo hacia el este, por lo que se podría estudiar reforzar la red de transporte público hacia esa zona y mejorarla en sus conexiones con el centro de la ciudad. Así mismo, se puede ir planeando como desarrollar el urbanismo de las zonas que van a crecer, como accesibilidad a red principal de carreteras, creación de parques y zonas verdes, etc.

5. Conclusiones

A raíz de los resultados obtenidos para la aplicación que se ha considerado en este trabajo, se ha procedido a elaborar un análisis de dichos resultados, cuyo fin principal es establecer un conjunto de conclusiones respectivas a los objetivos planteados al comienzo de este Trabajo Fin de Máster.

Cómo se ha comentado en el apartado introductorio, el objetivo principal consistía en el estudio de la aplicación de autómatas celulares para predecir el desarrollo urbano de Cantabria.

Tras la primera aplicación del modelo y con su posterior comparación con los datos del 2018, se puede comprobar que el modelo responde de forma correcta. Debido a esto, se procedió a la simulación de la evolución del uso del suelo en el año 2030. En este caso, observamos que la tendencia de crecimiento de los núcleos urbanos continúa siendo positiva, con un aumento contenido pero constante.

Este modelo ha sido realizado tomando una única fuente de datos y, aun así, ofrece resultados satisfactorios. Por lo que se podría plantear que, con el apoyo de otros modelos, otras fuentes de datos o sistemas GIS, la simulación ofrecería resultados más exactos y la previsión a futuro sería más fiable. Pero, tras esta aplicación se puede observar que la aplicación de autómatas celulares ofrece herramientas para planear un crecimiento urbano adecuado. Gracias a este método, se podría ir previendo el desarrollo de nuevas redes de transporte, nuevas líneas de transporte público o la ubicación de parques y zonas verdes en las zonas donde se producirá un mayor desarrollo.

Los objetivos secundarios de este trabajo consistían en el estudio del modelado de sistemas y de los autómatas celulares.

Se ha desarrollado una explicación de cómo se realiza el modelado de un sistema, con los diferentes tipos que hay en función del grado de simplificación, lo que permite modelar sistemas reales, como las ciudades, usando modelos escalares a sistemas imaginarios mediante el uso de modelos matemáticos. Gracias a la identificación del proceso de modelado, obtenemos una visión de los pasos a seguir, así como de las incógnitas y datos que debemos perseguir a la hora de comenzar a modelar. Así mismo, podemos ver que existen distintas formas de enfocar un sistema urbano, y tenemos varias teorías de comportamiento en función de las hipótesis planteadas. Personalmente, encuentro el enfoque físico social y el enfoque neoclásicos los más parecidos a las conductas de desarrollo. El primero se basaba en la interacción humana con el espacio, mientras el segundo lo hacía en el equilibrio económico.



El segundo de los estudios planteados era el del modelo de autómatas celulares. Gracias al “Juego de la Vida” de Conway se explica de forma muy sencilla el funcionamiento de este modelo. Se ha presentado y analizado como, gracias a la introducción de ciertas reglas, se pueden obtener sistemas que reproducen comportamientos muy complejos en base a premisas muy sencillas. Además, el uso de los autómatas celulares permite definir escenarios de simulación a futuro y adaptarlos a escenarios “what if”.

Mediante el análisis de varios estudios y aplicaciones del modelo de autómatas celulares, se demuestra que son una herramienta muy potente para el desarrollo urbano y que, gracias a una de sus cualidades más importantes, obtienen mejores resultados apoyándose en datos externos, que pueden ser desde modelos regionales, datos GIS, usos de tendencias de la población, ... Lo que queda claro es que es un modelo que ya ha sido aplicado por distintos investigadores y con el que se obtienen resultados satisfactorios, siendo así una gran herramienta para plantear distintos escenarios y, en base a las simulaciones, se pueden tomar las medidas correctivas desde los organismos de desarrollo urbano.

En mi opinión, creo que queda bastante claro el gran apoyo que supone el uso de un modelo urbano a la hora de la toma de decisiones y de desarrollo urbanístico. Gracias a estos modelos se puede prever la construcción o adecuación de infraestructuras, la ampliación o modificación de las redes de transporte y muchas más actuaciones. Además del uso de poder realizar experimentos de posibles escenarios y analizar como la toma de decisiones o aplicación de ciertas medidas puede afectar a una zona. Estos modelos permiten un desarrollo controlado y que sea posible una expansión sin que los habitantes pierdan calidad de vida.

Bibliografía

- Barredo, J. I., & Demicheli, L. (2003). Urban sustainability in developing countries' megacities: modelling and predicting future urban growth in Lagos. *Cities*, 20(5), 297-310.
- Barredo, J., Kasanko, M., McCormick, N., & Lavallo, C. (2003). Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata. *Landscape and Urban Planning*, 64, 145-160.
- Batty, M. (1997). Cellular automata and urban form: a primer. *Journal of the American Planning Association*, 266-274.
- Clarke, K., & Gaydos, L. (1998). Loose-Coupling a cellular automaton model and GIS: Long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. *International Journal of Geographical Information Science*, 12(7), 700.
- Collins English Dictionary. (2022 de Junio de 2022). *Collins English Dictionary*. Obtenido de <https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/model>
- Feng, Y., Liu, M., Chen, L., & Liu, Y. (2016). Simulation of dynamic urban growth with partial least squares regression-based cellular automata in a GIS environment. *International Journal of Geo-Information*(5), 243-259.
- Hewitt, R., Diaz Pacheco, J., & Moya Gomez, B. (2013). *A cellular automata land use model for the R software environment*. Recuperado el Junio de 2022, de <https://simlander.wordpress.com>
- Hewitt, R., Hernandez-Jimenez, V., & Escobar, F. (2012). Agentes, escenarios y autómatas celulares; modelización espacial para la toma de decisiones en Doñana y su entorno. *XV Congreso Nacional de Las Tecnologías de Información Geográfica en el contexto del Cambio Global*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).
- Liu, Y. (2009). *Modelling urban development with geographical development with geographical information systems and cellular automata*. Boca Raton: CRC Press.
- Liu, Y. (2009). *Modelling urban development with Geographical Information Systems and cellular automata*. Boca Ratón: CRC Press.
- Menard, A., & Marceau, D. (2005). Exploration of spatial scale sensitivity in geographic cellular automata. *Environment and Planning B*, 32, 693-714.
- Merriam-Webster. (25 de Junio de 2022). *Dictionary by Merriam-Webster*. Obtenido de <https://www.merriam-webster.com/dictionary/model>



- Real Academia Española . (25 de Junio de 2022). *Diccionario de la lengua española*. Obtenido de <https://dle.rae.es/modelo>
- Snodgrass, R. (1992). Temporal databases. En A. Frank, I. Campari, & U. Formentini (Edits.), *Theory and Methods of Spatio-Temporal Reasoning in Geographic Space* (págs. 22-64). Springer.
- Thomas, R., & Huggett, R. (1980). *Modelling in geography: a mathematical approach*. New Jersey: Barnes & Noble Books.
- Torrens, P. M. (2000). *How cellular models of urban systems work (1. theory)*. University College London. Centre for Advances Spatial Analysis.
- White, R., & Engelen, G. (1993). Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use. *Environment and Planning A*, 25, 1175-1199.
- White, R., & Engelen, G. (2000). High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems. *Computers, Environment and Urban Systems*, 24, 384-400.
- Wolfram, S. (1983). Statistical mechanics of cellular automata. *Reviews of Modern Physics*, 55, 601-644.
- Wolfram, S. (1984). Cellular automata as models of complexity. *Nature*, 419-424.
- Wolfram, S. (1994). *Cellular automata and complexity: collected papers*. .
- Wu, F. (1996). A linguistic cellular automata simulation approach for sustainable land development in a fast growing region. *Computers, Environment, and Urban Systems*, 20, 367-387.
- Wu, F. (1998). SimLand: a prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rules. *International Journal of Geographical Information Science*, 12, 63-82.
- Wu, F., & Webster, C. (1998). Simulation of land development through the integration of cellular automata and multicriteria evaluation. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 25, 103-126.
- Zadeh, L. (1962). From circuit theory to systems theory. *IRE Proceedings*, 50, 856-865.
- Zadeh, L. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8, 335-353.

Anexo 1

```

install.packages("rgdal")
install.packages("raster")
library(rgdal)
library(raster)
clc_90 <- raster("corine_1990.tif")
clc_00 <- raster("corine_2000.tif")
clc_06 <- raster("corine_2006.tif")
clc_12 <- raster("corine_2012.tif")
clc_18 <- raster("corine_2018.tif")
clc_90_val <- getValues(clc_90)
clc_00_val <- getValues(clc_00)
clc_06_val <- getValues(clc_06)
clc_12_val <- getValues(clc_12)
clc_18_val <- getValues(clc_18)
clc_90_tab <- as.data.frame(table(clc_90_val), stringAsFactors =
FALSE)
clc_00_tab <- as.data.frame(table(clc_00_val), stringAsFactors =
FALSE)
clc_06_tab <- as.data.frame(table(clc_06_val), stringAsFactors =
FALSE)
clc_12_tab <- as.data.frame(table(clc_12_val), stringAsFactors =
FALSE)
clc_18_tab <- as.data.frame(table(clc_18_val), stringAsFactors =
FALSE)
mat_rec <- matrix(c(1,5, 2,5, 3,6, 4,6, 5,6, 6,6, 7,6, 8,6, 9,6, 10,5,
11,5, 12,3, 13,3, 14,3, 15,2, 16,2, 17,2, 18,1, 19,2, 20,2, 21,2,
22,2, 23,4, 24,4, 25,4, 26,1, 27,1, 28,1, 29,1, 30,1, 31,1, 32,1,
33,1, 34,1, 35,1, 36,1, 37,1, 38,1, 39,1, 40,7, 41,7, 42,7, 43,7,
44,7), ncol=2, byrow=TRUE)
clc_90_rec <- reclassify(clc_90, mat_rec)
clc_00_rec <- reclassify(clc_00, mat_rec)
clc_06_rec <- reclassify(clc_06, mat_rec)
clc_12_rec <- reclassify(clc_12, mat_rec)
clc_18_rec <- reclassify(clc_18, mat_rec)
clc_90_recval <- getValues(clc_90_rec)
clc_00_recval <- getValues(clc_00_rec)
clc_06_recval <- getValues(clc_06_rec)
clc_12_recval <- getValues(clc_12_rec)
clc_18_recval <- getValues(clc_18_rec)
clc_90_rectab <- as.data.frame(table(clc_90_recval), stringAsFactors =
FALSE)
clc_00_rectab <- as.data.frame(table(clc_00_recval), stringAsFactors =
FALSE)
clc_06_rectab <- as.data.frame(table(clc_06_recval), stringAsFactors =
FALSE)
clc_12_rectab <- as.data.frame(table(clc_12_recval), stringAsFactors =
FALSE)
clc_18_rectab <- as.data.frame(table(clc_18_recval), stringAsFactors =
FALSE)
breakpoints <- c(0,1,2,3,4,5,6,7,8)

```



```

colors <-
c("cornsilk2","wheat4","yellow","forestgreen","darkred","darkslategrey",
,"skyblue3")
mat_lu <- matrix(c(1,0, 1,0, 2,0, 3,0, 4,0, 5,1, 6,0, 7,0), ncol=2,
byrow=TRUE)
mat_nolu <- matrix(c(1,0, 1,0, 2,0, 3,0, 4,0, 5,0, 6,NA, 7,NA),
ncol=2, byrow=TRUE)
lu_90 <- reclassify(clc_90_rec, mat_lu)
nolu_90 <- reclassify(clc_90_rec, mat_nolu)
lu_90_def <- mask(lu_90, nolu_90)
lu_00 <- reclassify(clc_00_rec, mat_lu)
lu_06 <- reclassify(clc_06_rec, mat_lu)
lu_12 <- reclassify(clc_12_rec, mat_lu)
lu_18 <- reclassify(clc_18_rec, mat_lu)
nolu_00 <- reclassify(clc_00_rec, mat_nolu)
nolu_06 <- reclassify(clc_06_rec, mat_nolu)
nolu_12 <- reclassify(clc_12_rec, mat_nolu)
nolu_18 <- reclassify(clc_18_rec, mat_nolu)
lu_00_def <- mask(lu_00, nolu_00)
lu_06_def <- mask(lu_06, nolu_06)
lu_12_def <- mask(lu_12, nolu_12)
lu_18_def <- mask(lu_18, nolu_18)
lu1 <- lu_90_def
lu2 <- lu_00_def
lu3 <- lu_06_def
lu4 <- lu_12_def
lu5 <- lu_18_def
w <- matrix(c(0,0,50,0,0, 0,50,50,50,0, 50,50,500,50,50, 0,50,50,50,0,
0,0,50,0,0), nr=5, nc=5)

change90_00 <- lu2-lu1
fun <- function(x) { x[x<0] <- NA; return(x) }
ch90_00 <- calc(change90_00, fun)

T1 <- lu1
print (paste("simulation starting at ", Sys.time(), sep=""))
startyear <- 1990
endyear <- 2000
total <- (endyear)-(startyear)

dflul <- as.data.frame(freq(lu1))
dflu2 <- as.data.frame(freq(lu2))
urbdemand <- as.numeric(dflul[2,2])
finaldemand <- as.numeric(dflu2[2,2])
andem <- (finaldemand - urbdemand)/total
andem <- round(andem,0)

print("set demand, starting timer..")
ptm <- proc.time()

pb <- txtProgressBar(min = 0, max = total, style = 3)
for (i in 1:total){
  urbdemand1 <- urbdemand + andem*i

```



```

#begin neighbourhood block
n <- focal(T1, w=w)
nhood <- cover(n, T1)
model_nhood <- nhood
#end neighbourhood block
#-----
#begin random block
x <-runif(ncell(T1))
weibull <- 1+(-log(1-(x)))*exp(1/2)
funselect <- function(x) { x[x!=0] <- NA; return(x) }
vacants <- calc(T1, funselect)
random <- lul #just copying lul as a skeleton map
values(random)<-weibull
model_random <- mask(random, vacants)
model_random <- cover(model_random,T1)

model_TTP <- (model_nhood+1)*(model_random)
fun <- function(x) { x[is.na(x)] <- 0; return(x) }
TTP <- calc(model_TTP, fun)
#r1demand <- 164
x <- as.matrix(TTP)
n <- urbdemand1
x2 <- sort(-x, partial = n)
x2h <- -sort(x2[1:n])
ix <- which(x %in% x2h)
rowsT1 <- nrow(T1)
colsT1 <- ncol(T1)
ro <- ix %% rowsT1
ro <- ifelse(ro == 0L, rowsT1, ro)
co <- 1 + ix %% rowsT1
x3 <- x[ix]
d <- data.frame(row = ro, col = co, x = x3)
result <- d[rev(order(d$x)), ]

difftrans <- (length(result$x)-n)
  if (difftrans > 0) {
    result2 <- head(result,-difftrans)
    result <- result2
  }

x.mat <- matrix(0, rowsT1, colsT1)
x.mat[cbind(result$row,result$col)] <-1
r <- raster(x.mat)
extent(r) <- extent(T1)
newdata <- r
newdata <- mask(newdata, lul)
T1 <- newdata

filen <- paste("lu", (startyear + i), ".png", sep="")
plot(T1,main=(startyear+i))
dev.off()

removeTmpFiles(h=5)

```



LUCÍA FERNÁNDEZ GUTIÉRREZ

```
    Sys.sleep(0.1)
    setTxtProgressBar(pb, i)
    print (paste("FINISHED: landuse simulation for ", (startyear +
i), sep=""))
    print(proc.time() - ptm)
}
close(pb)
png(filename = paste("lu", startyear, ".png", sep=""), width = 1200,
height = 1200, bg="white")
plot(lu1, main = paste("initial land use map - ", startyear, sep=""))
dev.off()
sim99 <- T1
sss <- stack(lu2, sim99)
name1 <- paste("real land use ", endyear, sep="")
name2 <- paste("simulated land use ", endyear, sep="")
names(sss) <- c(name1, name2)
print(plot(sss))
print (paste("simulation complete at ", Sys.time(), sep=""))
```