

APLICACIÓN DE UN MODELO BASADO EN AUTÓMATAS CELULARES IRREGULARES PARA LA SIMULACIÓN DE ESCENARIOS FUTUROS DE CAMBIOS DE USO DE SUELO URBANO

Tesis doctoral

Ramón Molinero Parejo
Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente
Universidad de Alcalá



Universidad
de Alcalá



Programa de Doctorado en Tecnologías de la Información Geográfica

**APLICACIÓN DE UN MODELO BASADO EN AUTÓMATAS CELULARES
IRREGULARES PARA LA SIMULACIÓN DE ESCENARIOS FUTUROS DE
CAMBIOS DE USO DE SUELO URBANO**

Tesis Doctoral presentada por

Ramón Molinero Parejo

Director/a:

Dr. Francisco Aguilera Benavente

Dra. Montserrat Gómez Delgado

Alcalá de Henares, 2023



DIRECTORES DE LA TESIS

Dr. Francisco Aguilera Benavente, Universidad de Alcalá

Dra. Montserrat Gómez Delgado, Universidad de Alcalá

TUTOR EN EL PROGRAMA DE DOCTORADO

Dr. Francisco Aguilera Benavente, Universidad de Alcalá

Diseño: Ramón Molinero Parejo

Portada: Ramón Molinero Parejo y Jesús Mudarra García

Universidad de Alcalá

Facultad de Filosofía y Letras

Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente

Área de Geografía Humana

Colegio de Málaga. Calle Colegios, 2 Alcalá de Henares, Comunidad de Madrid. España.

TESIS DOCTORAL 2019 – 2023

Ramón Molinero Parejo

A mi familia y amigos,

It is simply impossible to think of this type of planning without some spatial representation – without a map, in other words.
– Peter Hall

Only through time can a model be «verified» in any conventional sense of the word.
– Michael Batty



PREFACIO

En 2019 tiene comienzo la presente tesis doctoral, realizada bajo el marco del proyecto TRANSURBAN. Este se centra en aportar soluciones sostenibles en la planificación de la ciudad y el territorio, a través de la simulación de escenarios colaborativos para el diseño y evaluación de políticas integradas de transporte y usos de suelo en ámbitos urbanos, combinando metodologías de tipo cualitativo (enfoques colaborativos), cuantitativo (modelación de dinámicas urbanas) y de diseño (propuestas de políticas e intervenciones urbanas). Bajo esta idea, se ha investigado el desarrollo de metodologías combinadas aplicables y complementarias a los actuales instrumentos de planificación urbana empleando las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) como punto de partida.

En términos generales, esta investigación podría situarse dentro de la geografía urbana. No obstante, este es un campo de investigación muy amplio, el cual puede enfocarse desde diversos puntos de vista. En este caso, se va a tomar como punto de partida la planificación urbana.

Desde una perspectiva general, este concepto abarca todo el proceso que acoge a las actividades, los medios y los instrumentos que intervienen en el diseño y gestión de las áreas urbanas, es decir, de todos los asentamientos humanos (presenten un carácter urbano o rural). En este sentido, la planificación urbana es un concepto universal. Una tarea que todos los países del mundo llevan a cabo, en mayor o menor medida. Se trata, por tanto, de un conjunto de instrumentos de gestión diseñados para potenciar el desarrollo social y económico de los espacios urbanos, así como el bienestar y la calidad de vida de las personas que residen en dichos espacios. Y todo ello, de la manera más eficiente posible.

Sin embargo, la complejidad de los sistemas urbanos es una realidad que dificulta las tareas de planificación. Derivado de ello, surgen numerosos problemas relacionados con el desarrollo de estos espacios, los cuales requieren una rápida respuesta para evitar impactos irreversibles sobre el medio natural. El crecimiento exponencial que están experimentando las áreas urbanas es uno de ellos. Pero este crecimiento no se limita al incremento poblacional, sino también al aumento del número de actividades humanas, así como la expansión de los asentamientos sobre el territorio. Esta última cuestión continua vigente como uno de los principales fenómenos a controlar por los instrumentos de planificación urbana. Y es que, así como el agua es un recurso esencial y básico para la vida, el suelo también lo es, siendo este uno de los más afectados por la expansión de las áreas urbanas.

Prestando atención a los problemas derivados de la evolución de los sistemas urbanos mencionados anteriormente, destaca la necesidad de crear instrumentos de planificación adecuados, y sobre todo actualizados, que minimicen los impactos que el crecimiento urbano genera sobre el territorio. Para ello, los nuevos instrumentos deben ser adaptativos. Al igual que el tamaño y las características de la población cambian en el tiempo, también cambian sus

necesidades, así como la distribución espacial de sus asentamientos. Entonces ¿cómo lograr una gestión adecuada de los cambios territoriales producidos por la evolución del crecimiento urbano?

Cuando se habla de planificar o gestionar el crecimiento urbano es imprescindible hacer un esfuerzo de pensamiento futuro. Esto se debe a que el objetivo fundamental de esta tarea consiste en diseñar un futuro deseado. Pero tratar con el futuro requiere tratar con la incertidumbre. Esta ausencia de certeza lleva a formular las siguientes preguntas: ¿cómo serán...? ¿cómo pueden ser...? ¿cómo deben ser...? y, sobre todo, ¿cómo quiere la población que sean... las ciudades del siglo XXI? Este paradigma futuro va más allá del simple hecho de predecir. Las predicciones futuras intentan reproducir lo que es más probable que suceda. Pero la incertidumbre, a menudo, juega malas pasadas.

A este respecto, se puede afirmar que lo que es más probable que suceda, no es lo que siempre ocurre. Y es aquí donde entra en juego el papel de los escenarios, una herramienta capaz de lidiar con la incertidumbre inherente a la evolución del crecimiento urbano. Los escenarios representan una imagen plausible del futuro. Es posible imaginar, diseñar y crear tantos futuros como sea posible, aunque es importante ceñirse a un acotado abanico de posibilidades, ya que estas son infinitas. Pero para que el uso de escenarios sea eficaz contra la incertidumbre, estas imágenes hipotéticas del futuro deben ser tanto plausibles como disruptivas, es decir, también deben considerarse opciones que, aunque no se crean posibles, pueden suceder. Ejemplos como pandemias globales, avances tecnológicos significativos, fenómenos naturales súbitos o conflictos bélicos internacionales son algunos ejemplos de acontecimientos disruptivos que han tenido lugar en el siglo XXI y que pueden afectar a la evolución de las ciudades. Así, para hacer una gestión adecuada de estas, es necesario diseñar métodos que ayuden a la planificación urbana a adaptarse a las diversas situaciones futuras que puedan sobrevenir. Este enfoque es lo que se conoce como planificación prospectiva.

De forma paralela al uso de escenarios en la planificación urbana, los modelos de simulación han demostrado ser un instrumento de gran valor en la representación espacial de los patrones urbanos y los usos del suelo. La combinación de ambos ha resultado en una herramienta de gran interés y utilidad para los planificadores y los encargados de la toma de decisiones. Esta ha permitido plasmar en un mapa cómo pueden evolucionar los usos del suelo urbano bajo distintos escenarios futuros. Así, es posible conocer bajo diferentes supuestos donde se podrían construir nuevas urbanizaciones residenciales, donde podrían ubicarse los nuevos complejos industriales o como puede afectar la construcción de nuevos centros comerciales a la planificación de nuevas viviendas.

Pero, para que estas representaciones espaciales sean lo más realistas posibles y tracen aquellas características más significativas de cualquier tipo de escenario futuro (disruptivo o no), los instrumentos deben actualizarse y adaptarse a la nueva información disponible. Esta es una de las cuestiones principales que la presente tesis doctoral desarrolla como apoyo a la toma de decisiones en la planificación y gestión de las áreas urbanas. No pretende ser un instrumento que determine la localización exacta de donde y como deben crecer los nuevos desarrollos urbanos, sino un instrumento de apoyo para fomentar el diálogo, debatir ideas, entender las dinámicas, incentivar la observación espacial y facilitar la identificación de posibles impactos que puedan derivarse de cualquier situación venidera.



AGRADECIMIENTOS

Una tesis doctoral es una carrera de fondo y en solitario, o eso me decían mis directores de tesis. Y, en gran medida, es cierto. Pero también han sido muchas las personas que me han acompañado en el transcurso de esta investigación compartiendo sus conocimientos, sus reflexiones y sus críticas conmigo.

En primer lugar, me gustaría agradecer a Fran y Montse, mis directores de tesis y quienes han hecho posible que gran parte de este trabajo haya salido adelante. Cada vez que teníamos una reunión, una charla o intercambiábamos unas pocas palabras, aprendía algo nuevo. Aprendí no solo conceptos teóricos y prácticos relacionados con la investigación, sino también a ser una persona resolutiva, autónoma y capaz de afrontar cualquier problema. Para mí, ha sido un privilegio poder aprender de dos de los mejores docentes que he tenido a lo largo de mi etapa en la universidad. Pero han sido sus valiosos consejos, su enorme dedicación, su continuo apoyo, su inagotable paciencia y su empatía lo que ha hecho posible que haya sido capaz de formarme como doctor. Gracias por valorar mi esfuerzo y mi trabajo.

En segundo lugar, quisiera agradecer a Niko, mi profesor de programación en la sombra. Parte de este trabajo ha sido gracias a ti. Gracias por tu apoyo, tus consejos y tus ánimos. También he aprendido mucho de ti. Una tesis en buena compañía siempre es más llevadera.

Quisiera expresar mi gratitud a Víctor, de quien he tenido todo el apoyo durante mi etapa en la Universidad de Alcalá y quien me ha acompañado, junto con mis directores, en mis primeros pasos en la docencia. Al mismo tiempo, me gustaría agradecer a Julio, Amor, Belén, Miguel, Manu y todo el equipo de TRANSURBAN y SIM4PLAN por el buen trabajo realizado. Todos habéis sido partícipes de esta investigación.

A Patxi, por su dedicación y preocupación por todos los alumnos del programa de doctorado. A todos los profesores y profesoras que me han impartido clases durante el Máster. A todo el personal del Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente. A Daniel, por estar siempre ahí para ayudar con cualquier gestión informática. Y, en general, a todas las personas de la Universidad de Alcalá (PDI y PAS) que han sido partícipes de mi etapa de doctorado y me han ayudado a alcanzar la meta. Gracias.

A mis compañeros/as de doctorado, quienes han hecho más ameno mi paso por la universidad y quienes han compartido sus ideas, su conocimiento y muchos momentos alegres tanto fuera como dentro de la universidad. A Elena, Alba, Nacho, Pablo, Tarek, Rubén, Gonzalo, Cristian, Clara, Sofía, Amín, Marina, César, Roberto, Geovanna y un largo etcétera. Gracias.

Y no me gustaría olvidar mi etapa universitaria en Granada. Gracias a la profesora María Teresa Camacho y al profesor José Antonio Cañete por marcarme el camino durante mis primeros pasos hacia las TIG. Y gracias a David por enseñarme y darme consejos como profesor y compañero.

Thanks to Professor Gil for assisting me during my visit to the USA and to Thomas for the very interesting conversations and for the assistance provided.

Fuera del ámbito universitario, aunque no por ello menos importante, me gustaría mostrar unas sinceras palabras de agradecimiento a toda mi familia. Especialmente, a mi madre, a mi padre, a mi hermano y a mi hermana. Me habéis enseñado todo lo que importa que no se aprende en la universidad y me habéis apoyado en los buenos y malos momentos. Este logro también es vuestro. Gracias de corazón.

A todas esas personas tan majas que me he encontré al llegar a Madrid. En especial a Carla, Dani, Mery, Fer, Celia y Jorge. Gracias por todo. Posiblemente sin vosotros, ya me habría vuelto a Granada.

Por último, concedo estas líneas a esa familia que se elige. A mis amigos de Granada. A Antonio, Yesu, Sandra, Irene, Pili, Miriam, Javi, Vicente, Yosi y todas aquellas personas que me habéis apoyado y animado a pesar de la distancia. Gracias por esas visitas a Madrid y por acordaros siempre de mí.



Mis más sinceros agradecimientos al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y el Fondo Social Europeo, quienes han financiado la presente investigación a través de las ayudas prestadas incluidas en el Programa Estatal de Promoción del Talento y su Empleabilidad en I+D (PRE2018-084663). También agradezco al Ministerio de Economía y Competitividad por financiar el proyecto TRANSURBAN (CSO2017-86914-C2-2-P), en el cual se enmarca la presente investigación, y al Ministerio de Ciencia e Innovación y a los fondos *NextGeneration EU* por financiar el proyecto SIM4PLAN (PDC2021-121568-C22) para la transferencia de conocimientos.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	1
ABSTRACT	3
ESTRUCTURA GENERAL	5
INTRODUCCIÓN	8
HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	15
2.1. Hipótesis	15
2.2. Objetivos	15
MARCO TEÓRICO	18
3.1. La planificación urbana. Evolución histórica y retos actuales	18
3.1.1. Contexto histórico de la planificación urbana	20
3.1.2. Retos actuales de la planificación urbana	24
3.2. Los escenarios en la planificación urbana	26
3.2.1. El pensamiento futuro	26
3.2.2. Tipos de escenarios y enfoques de pensamiento futuro	27
3.2.3. Los escenarios disruptivos	30
3.2.4. La creación de escenarios participativos y su representación espacial	32
3.3. Modelización espacial de sistemas urbanos complejos	35
3.3.1. Origen y evolución de la modelización espacial	36
3.3.2. Los modelos de simulación del crecimiento urbano	40
3.3.2.1. Métodos estadísticos para la selección de factores explicativos	41
3.3.2.2. Instrumentos de simulación espacial del crecimiento urbano	43
3.3.3. Los AC en la simulación de escenarios de crecimiento urbano	46
3.3.4. Adaptación de los AC a las nuevas necesidades de la planificación urbana	48
3.3.4.1. El entorno de los AC: del píxel a la parcela	48
3.3.4.2. Los ciclos temporales	49
3.3.4.3. La expresión del factor de vecindad	50
3.3.4.4. Los usos del suelo y la dinámica urbana: crecimiento, conversión y pérdida	51

3.3.5. Calibración participativa de modelos de simulación prospectiva	52
3.3.6. Validación parcial de modelos de simulación prospectiva	54
3.4. Caracterización y evaluación espacial de escenarios urbanos	55
3.4.1. Las métricas de paisaje en la caracterización de los patrones urbanos	55
3.4.2. Evaluación de los patrones de expansión urbana	57
3.4.3. Evaluación de los patrones de diversidad urbana	58
3.4.4. Adaptación de métricas de paisaje a conjuntos de datos vectoriales	60
DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	65
4.1. Diseño y cartografiado de escenarios disruptivos	66
4.2. Identificación de factores explicativos de crecimiento urbano	83
4.3. Simulación prospectiva de escenarios futuros disruptivos	111
4.4. Validación parcial del modelo de simulación vectorial LP-CA	135
4.5. Aplicación de métricas espaciales para la caracterización de escenarios	140
CONCLUSIONES, LIMITACIONES Y LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	165
5.1. Conclusiones generales	165
5.2. Limitaciones y líneas futuras de investigación	168
CONTRIBUCIONES Y PUBLICACIONES INCLUIDAS EN LA TESIS DOCTORAL	171
OTRAS CONTRIBUCIONES Y PUBLICACIONES RELACIONADAS	173
REFERENCIAS	175



LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Estructura general de la tesis.	5
Figura 2. Evolución de la población urbana en España y en el mundo entre 1960 y 2020. Datos representados en porcentaje del total de población (izquierda) y porcentaje de crecimiento anual (derecha). Estimaciones del Banco Mundial basadas en Naciones Unidas - <i>World Urbanization Prospects</i> (2018).	9
Figura 3. Boceto de la <i>Ciudad Lineal</i> diseñada por el arquitecto español <i>Arturo Soria y Mata</i> , basado en un sistema central de transporte. Fuente: Hall (2002).	21
Figura 4. Diagrama de la primera edición del libro de Ebenezer Howard que representa el modelo de la idea de las ciudades jardín agrupadas en aglomeraciones urbanas planificadas. Fuente: Hall (2002).	21
Figura 5. Esquema del diseño de distintos tipos de supermanzanas caracterizadas por calles exteriores que rodean las manzanas urbanas y la transformación del espacio interior de las calles.	23
Figura 6. Retos de la planificación actual y cómo afrontarlos. Esquema basado en Goodspeed (2020).	25
Figura 7. Posibles cambios en la tendencia de un sistema que justifican el uso de escenarios exploratorios. Extraído y adaptado de Barreira-González et al. (2015).	29
Figura 8. Cono de los escenarios (<i>Scenario funnel</i>). Extraído y adaptado de Timpe & Scheepers (2003).	32
Figura 9. Proceso de una actividad de tipo visioning para la integración de actividades participativas en el proceso de planificación de escenarios (Reality Check). Extraído y adaptado de Chakraborty (2011).	33
Figura 10. El modelo de <i>Von Thünen</i> de precio, uso y renta de la tierra (Nelson, 2002).	37
Figura 11. Entorno hexagonal de <i>Christaller</i> según los principios organizativos (Kitchin & Thrift, 2009).	37
Figura 12. Ejemplo de un patrón espacial del <i>Juego de la Vida</i> formado tras 57 iteraciones a partir de una única celda viva. Extraído de Adamatzky (2010).	39

Figura 13. Método científico, proceso de modelización y proceso de planificación. Extraído y adaptado de Batty (1976).	39
Figura 14. Estructura general de los modelos de cambio de uso del suelo espacialmente explícitos (Verburg et al., 2006).	41
Figura 15. Evolución de los modelos de crecimiento urbano. Extraído de Li & Gong (2016).	44
Figura 16. Representación y funcionamiento de un AC en el cambio de los usos del suelo. Fuente: Elaboración propia.	47
Figura 17. Funcionamiento de un modelo irregular basado en AC para la simulación del crecimiento urbano utilizando la parcela catastral como unidad espacial de referencia. Fuente: Elaboración propia.	48
Figura 18. Representación gráfica de los distintos métodos espaciales para definir la relación de vecindad entre las distintas parcelas que conforman entorno urbano. Fuente: Elaboración propia.	50
Figura 19. Combinación de conocimientos derivados del ámbito analítico/técnico y del ámbito discursivo para una adecuada calibración. Extraído y adaptado de Hewitt et al. (2014).	52
Figura 20. A la izquierda, cálculo global de una métrica del paisaje para una categoría (mapa binario). A la derecha, cálculo basado en la vecindad de la misma métrica de paisaje mediante ventana móvil (mapa de superficie continua). El borde negro representa los píxeles sin datos con una profundidad igual al tamaño de la ventana móvil. Fuente: Cushman et al. (2010).	57
Figura 21. Evolución espacial hipotética de las áreas urbanas. Extraído y adaptado de Dietzel et al. (2005).	58
Figura 22. Diagrama que muestra el cálculo de un índice de diversidad para el estudio de la biodiversidad de especies (arriba) y la mezcla de usos y funciones de la ciudad (abajo). Extraído y adaptado de Yoshimura et al. (2021).	59
Figura 23. Adaptación de LEI al conjunto de datos vectoriales para la identificación de los tipos de crecimiento durante el proceso de expansión urbana. Fuente: Elaboración propia.	61
Figura 24. Adaptación del cálculo de diversidad urbana a conjuntos de datos vectoriales empleando distintos tamaños de ventana móvil. Fuente: Elaboración propia.	61
Figura 25. Esquema del desarrollo de la investigación estructurado a partir de las publicaciones científicas y su relación con los objetivos abarcados.	65
Figura 26. Resultados de la fase de simulación del prototipo SIM4PLAN.	170



LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Tasa de crecimiento anual de la superficie urbanizada (ha) y de la población total en España en diferentes periodos.	8
Tabla 2. Resumen de los aspectos clave según los tipos de escenarios.	28
Tabla 3. Software basados en el cálculo de métricas de paisaje de datos vectoriales.	62



RESUMEN

La urbanización es uno de los fenómenos más drásticos de transformación del territorio. En las últimas décadas, este fenómeno ha experimentado un aumento vertiginoso. Según indica el informe más reciente de *World Urbanization Prospects* de Naciones Unidas, se estima que el 68,4% de la población mundial vivirá en zonas urbanas en 2050. Además, se prevé que dicha población se duplique en los países desarrollados y se triplique en los países en vías de desarrollo. Todo ello ha supuesto impactos irreversibles sobre el territorio, afectando enormemente al conjunto de la sociedad en términos de gestión y acceso a recursos, problemas de índole social y económica, contaminación ambiental, etc.

Ante esta situación, se ha observado un creciente interés por el desarrollo y mejora de instrumentos que den soporte a la toma de decisiones y a la gestión de las áreas urbanas. Uno de los instrumentos más empleados para este fin ha sido la planificación de escenarios futuros. Este permite conocer cómo podría afectar la evolución de los usos del suelo urbano a la configuración de los patrones espaciales bajo distintas perspectivas futuras. Con este enfoque, la planificación de escenarios trata de reducir la incertidumbre facilitando la toma de medidas proactivas para minimizar los posibles impactos territoriales.

No obstante, la planificación de escenarios puede verse limitada ante un futuro complejo e incierto si todos los escenarios se mantienen muy próximos a una proyección tendencial. Como ejemplo, el surgimiento de acontecimientos inesperados puede llegar a inhabilitar la utilidad de una planificación lineal basada únicamente en tendencias pasadas. Por dicha razón, y para gestionar de la mejor manera posible los futuros desarrollos urbanos (no) deseados, el pensamiento disruptivo debe formar parte del proceso de previsión, rompiendo así con la linealidad de los acontecimientos actuales para abarcar lo inesperado.

Como parte del proceso de planificación urbana, los modelos de simulación intentan representar el desarrollo futuro de las ciudades para garantizar que puedan desarrollarse de manera eficiente y sostenible. De ellos, los modelos basados en Autómatas Celulares (AC) se encuentran entre los más utilizados como apoyo a la gestión de las áreas urbanas. Estos modelos han experimentado una importante flexibilización, adaptándose a entornos irregulares (parcelario catastral) para ofrecer simulaciones de cambio de uso del suelo urbano a escala local.

En esta línea, son cada vez más los estudios que combinan escenarios narrativos con tareas de modelización de manera participativa, y todo ello con la finalidad de obtener resultados más realistas que contemplen los actuales retos que afronta la planificación urbana. Sin embargo, es difícil que estos modelos consideren por sí solos la amplia gama de factores que intervienen en la evolución futura de las zonas urbanas, especialmente cuando tratan de representar escenarios imaginativos y disruptivos. Ante la situación actual en la que se encuentra la planificación espacial de escenarios urbanos, la presente investigación desarrolla e implementa una metodología que trata de cubrir algunos de los huecos más notables que se observan en este ámbito de estudio.

En primer lugar, se presenta un estudio basado en el diseño y cartografiado de escenarios disruptivos a través de un taller participativo donde colaboraron conjuntamente expertos de diversos ámbitos relacionados con el urbanismo y el transporte. Los resultados derivados de dicho taller se analizaron mediante un método estadístico denominado Regresión Logística Geográficamente Ponderada (RLGP) con el objetivo de determinar los principales factores que explican la localización de los usos del suelo urbano en los distintos escenarios disruptivos.

Posteriormente se emplearon los resultados del análisis previo para calibrar un nuevo modelo desarrollado basado en AC vectoriales, denominado *Land Parcel – Cellular Automata* (LP-CA). Este se encarga de simular a futuro diferentes escenarios imaginativos y disruptivos reproduciendo dinámicas urbanas de crecimiento, cambio y pérdida de usos del suelo. Al mismo tiempo, se aplicó una metodología de validación parcial para observar la robustez del modelo respecto a la influencia de los factores en las simulaciones.

Finalmente, se aplicó una metodología innovadora diseñada para evaluar los diferentes escenarios disruptivos. Esta emplea métricas espaciales multiescalares basadas en el uso de ventanas móviles aplicadas a nivel de parcela que permiten caracterizar la diversidad y el tipo de expansión urbana. La metodología desarrollada fue aplicada a un sector del Corredor del Henares (España), empleándose este como laboratorio territorial experimental.

Los resultados han demostrado la utilidad de la integración de escenarios disruptivos en la planificación espacial para mostrar contrastes entre los diferentes escenarios, destacando la utilidad de las visiones y del taller de cartografiado participativo en la representación espacial de la cantidad y dirección del crecimiento de los usos urbanos y la organización de la red de transporte. De manera complementaria, el análisis estadístico mediante RLGP permitió un ajuste relevante del parámetro de aptitud en el modelo de simulación, hecho que favoreció una calibración más adaptada a cada escenario.

En cuanto a los avances desarrollados para el modelo LP-CA, las simulaciones lograron reproducir satisfactoriamente dinámicas urbanas disruptivas (además de crecimiento, transformación de usos y abandono). Los patrones espaciales generados se ajustaron a los escenarios narrativos descritos. Adicionalmente, el análisis de sensibilidad constató la incidencia equilibrada de todos los factores en las simulaciones generadas por el modelo LP-CA. Por último, la evaluación de escenarios permitió caracterizar en profundidad y realizar comparaciones más detalladas de las implicaciones territoriales de cada escenario en lo que respecta a la diversidad y al tipo de expansión urbana.

En conclusión, la información proporcionada por esta investigación aporta nuevas herramientas y mejora algunos de los métodos ya existentes dentro de la planificación espacial de escenarios. Concretamente, ofrece una novedosa metodología capaz de generar simulaciones de crecimiento y cambio en los usos del suelo urbano para escenarios futuros disruptivos. Los resultados facilitan la observación de la propagación espacial de la incertidumbre asociada a los eventos futuros a través de los patrones que configuran los nuevos usos del suelo. En definitiva, trata de extraer información compleja de diferentes enfoques de evolución urbana futura, presentándola de manera sencilla para que pueda ser empleada por los responsables de la toma de decisiones.



ABSTRACT

Urbanisation is one of the most drastic phenomena of territorial transformation. Over the last decades, this phenomenon has been increasing at a dizzying rate. According to the latest World Urbanization Prospects report, it is estimated that 68.4% of the world's population will live in urban areas by 2050. Moreover, this population is expected to double in developed countries and triple in developing countries. This has generated an irreversible impact on the territory, affecting society in terms of management and access to resources, social and economic problems, environmental pollution, etc.

In view of this situation, there has been a growing interest in the development and improvement of instruments to support decision-making and management of urban areas. One of the most widely used instruments for this purpose has been future scenario planning. This provides insight into how the evolution of urban land uses might affect the configuration of spatial patterns under different future scenarios. With this approach, scenario planning seeks to reduce uncertainty by facilitating proactive measures to minimise potential spatial impacts.

However, scenario planning may be limited in the face of a complex and uncertain future if all scenarios remain very close to a trend projection. As an example, the occurrence of unexpected events can render linear planning based solely on past trends unhelpful. For this reason, and in order to best manage (un) desired future urban developments, disruptive thinking must be part of the visioning process, thus breaking with the linearity of current events to embrace the unexpected.

As part of the urban planning process, simulation models attempt to represent the future development of cities to ensure that they can develop efficiently and sustainably. Of these, Cellular Automata (CA) models are among the most widely used to support the management of urban areas. These models have undergone significant flexibilization, adapting to irregular environments (cadastral parcels) to provide simulations of urban land use change at a local scale.

In this respect, an increasing number of studies are combining narrative scenarios with participatory modelling tasks, all with the aim of obtaining more realistic results that address the current challenges facing urban planning. However, it is difficult for these models alone to consider the wide range of factors involved in the future evolution of urban areas, especially when they attempt to represent imaginative, disruptive scenarios. Given the current situation of urban scenario planning, the present research develops and implements a methodology that attempts to fill some of the most notable gaps in this area of study.

Firstly, a study based on the design and mapping of disruptive scenarios is presented through a participatory workshop in which experts from various fields related to urban planning and transport collaborated together. The results derived from this workshop were analysed using a statistical method called Geographically Weighted Logistic Regression (GWLR) in order to

determine the main factors that explain the location of urban land uses in the different disruptive scenarios.

Subsequently, the results of the previous analysis were used to calibrate a new model developed based on vector CA, called Land Parcel - Cellular Automata (LP-CA). This model simulates different imaginative and disruptive future scenarios reproducing urban dynamics of growth, change, and loss of land use. At the same time, a partial validation method was applied to observe the robustness of the model with respect to the influence of the factors in the simulations.

Finally, an innovative methodology designed to assess the different disruptive scenarios was applied. It employs multi-scale spatial metrics based on the use of moving windows applied at the parcel level that allow characterising the diversity and type of urban expansion. The developed methodology was applied to a sector of the Henares Corridor (Spain), which was used as an experimental territorial laboratory.

The overall results have demonstrated the usefulness of the integration of disruptive scenarios in spatial planning to show contrasts between different scenarios, highlighting the usefulness of the visions and the participatory workshop in the spatial representation of the amount and direction of growth of urban uses and the organisation of the transport network. In a complementary way, the statistical analysis by means of RLGP allowed a relevant adjustment of the suitability parameter in CA-based models, which favoured a calibration more adapted to each scenario.

Concerning the progress of the LP-CA model, the simulations successfully reproduced disruptive urban dynamics (in addition to growth, transformation of uses and abandonment). The spatial patterns generated were in line with the narrative scenarios described. Additionally, the sensitivity analysis verified the balanced incidence of all factors in the simulations generated by the LP-CA model. Finally, the scenario evaluation allowed for a more detailed characterisation and comparison of the territorial implications of each scenario in terms of diversity and type of urban expansion.

In conclusion, the information provided by this research provides new tools and improves some of the existing methods within spatial scenario planning. In particular, it offers a novel methodology capable of generating simulations of growth and urban land use change for disruptive future scenarios. The results facilitate the observation of the spatial propagation of uncertainty associated with future events through the patterns that shape new land uses. Ultimately, it seeks to extract complex information from different approaches to future urban evolution, presenting it in a simple way so that it can be used by decision-makers.



ESTRUCTURA GENERAL

La presente tesis se estructura en cinco capítulos (figura 1). El capítulo 1 proporciona una descripción sintética del problema actual derivado del proceso de urbanización que afronta la planificación urbana. El capítulo 2 presenta la hipótesis y los objetivos planteados. El capítulo 3 hace una síntesis de los antecedentes, investigaciones previas y consideraciones más relevantes de los principales aspectos teóricos que se han tratado durante el desarrollo de la investigación. El capítulo 4 detalla la metodología aplicada y expone los principales resultados obtenidos a través de cuatro artículos, tres de ellos publicados en revistas internacionales de impacto revisadas por pares y un cuarto artículo en proceso de revisión. El capítulo 5 muestra las conclusiones generales, las principales limitaciones y los aspectos más relevantes para continuar con la investigación.

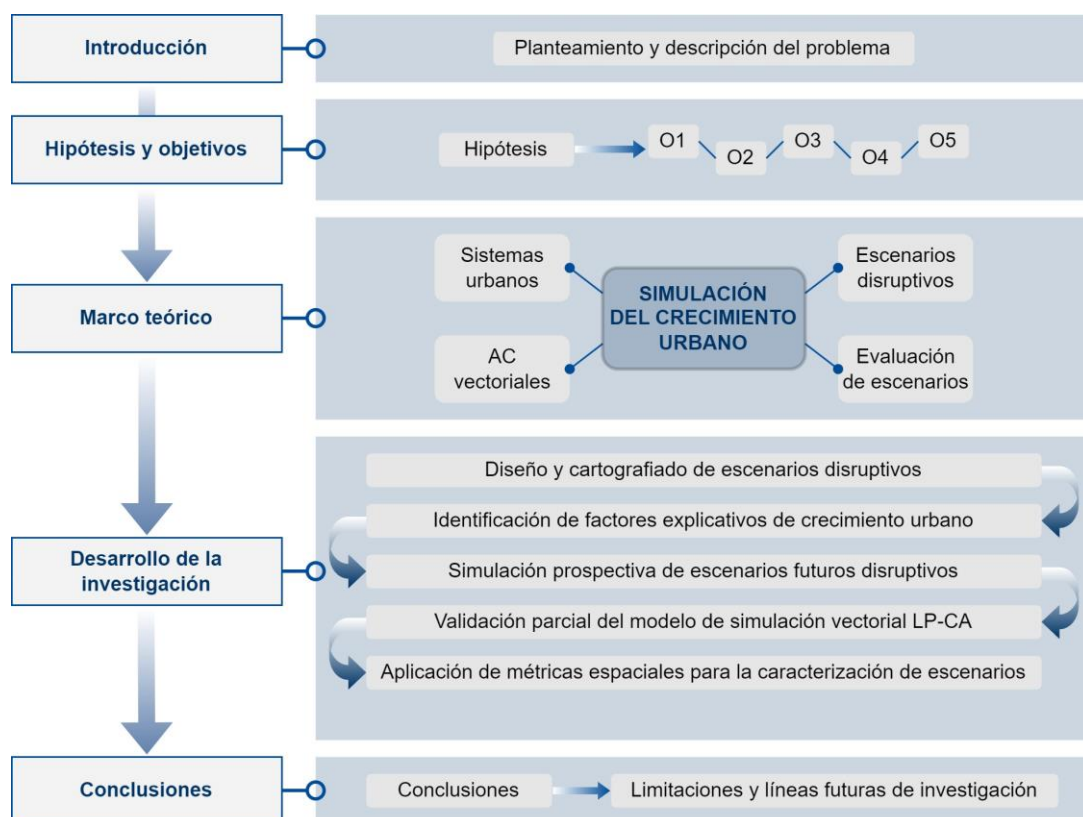



Figura 1. Estructura general de la tesis.



«Una ciudad que planifica no sólo proyecta el futuro a partir de tendencias pasadas, sino que también reúne a los sectores público, privado y terciario con las comunidades para construir un futuro preferido colectivamente».

UN-Habitat (2016): World Cities Report 2016. Urbanization and Development, Emerging Future.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN



CAPÍTULO 1



INTRODUCCIÓN

A nivel global, la superficie urbanizada ocupa cerca del 3% del planeta (Li et al., 2018), aunque esta cifra varía entre el 1 y el 3% en la literatura debido a las diferencias existentes a la hora de definir los límites del suelo urbano (Liu et al., 2014). A pesar de que esta cifra es relativamente pequeña, las áreas urbanas contribuyen al 78% de las emisiones de carbono, al 60% del consumo residencial de agua y al 76% del uso industrial de madera (Grimm et al., 2008), por resaltar algunos aspectos. Es por ello por lo que el proceso de urbanización es considerado uno de los fenómenos que provocan una de las transformaciones territoriales más dramáticas, el cual influye profundamente en la diversidad biológica y la vida humana (Luck & Wu, 2002). Este se define principalmente como la transformación de suelo rústico en suelo urbano, aunque también implica aquellos cambios que la población registra en cuanto a sus comportamientos asociados al fenómeno urbano (Zoido Naranjo et al., 2000). Es, por tanto, un proceso territorial y social que tiene como objetivo albergar los nuevos asentamientos urbanos que conforma la población, así como sus actividades.

Históricamente, y desde una perspectiva global, este proceso ha sido consecuencia directa del crecimiento general de la población, el cual ha estado determinado por el balance positivo entre defunciones y nacimientos (Puyol, 2012). No obstante, en las últimas décadas, la relación entre el crecimiento urbano y el crecimiento demográfico no ha sido tan estrecha. Como se observa en la tabla 1, la expansión urbana no ha evolucionado de forma paralela al incremento de la población en España. Concretamente, en el periodo 2012 – 2018 se produjo un decrecimiento de la población, el cual fue acompañado paradójicamente de un incremento de la superficie urbanizada que marcaba un ritmo de medio punto anual. En esta línea, se ha podido observar que el aumento de las actividades humanas con implicaciones económicas, sociales y políticas también es consecuencias del incremento de la superficie urbanizada (Bharath et al., 2018), hecho que hace aún más complejo el entendimiento de este fenómeno espaciotemporal.

Tabla 1. Tasa de crecimiento anual de la superficie urbanizada (ha) y de la población total en España en diferentes periodos.

Periodo	Superficie urbanizada	Población
1990 - 2000	2,54 %	0,42 %
2000 - 2006	3,53 %	1,46 %
2006 - 2012	4,01 %	1,06 %
2012 - 2018	0,52 %	-0,06 %

*Datos de superficie urbanizada calculados a partir de *Corine Land Cover* (CLC) y datos de población extraídos del Instituto Nacional de Estadística (INE).

Sin embargo, a pesar de que el incremento de la población no es el único componente que condiciona el crecimiento de las ciudades, se puede afirmar que la evolución demográfica acontecida desde mediados del siglo XX, caracterizada por el éxodo rural entre otros aspectos, ha sido determinante en el proceso de urbanización (Baudin & Stelter, 2022). Concretamente, la población urbana ha experimentado un notable incremento liderado principalmente por países en vías de desarrollo. Según las estimaciones del Banco Mundial basadas en los datos de Naciones Unidas - *World Urbanization Prospects* (2018), algunos países como Japón, Jordania, Finlandia, México, Colombia o Brasil, con tasas de población urbana superiores al 40% del total en 1960, han experimentado un incremento superior al 30% en los últimos 70 años. España, en dicho periodo, ha pasado de un 56,57 % a un 81,06% (figura 2), una cifra que para nada pasa desapercibida.

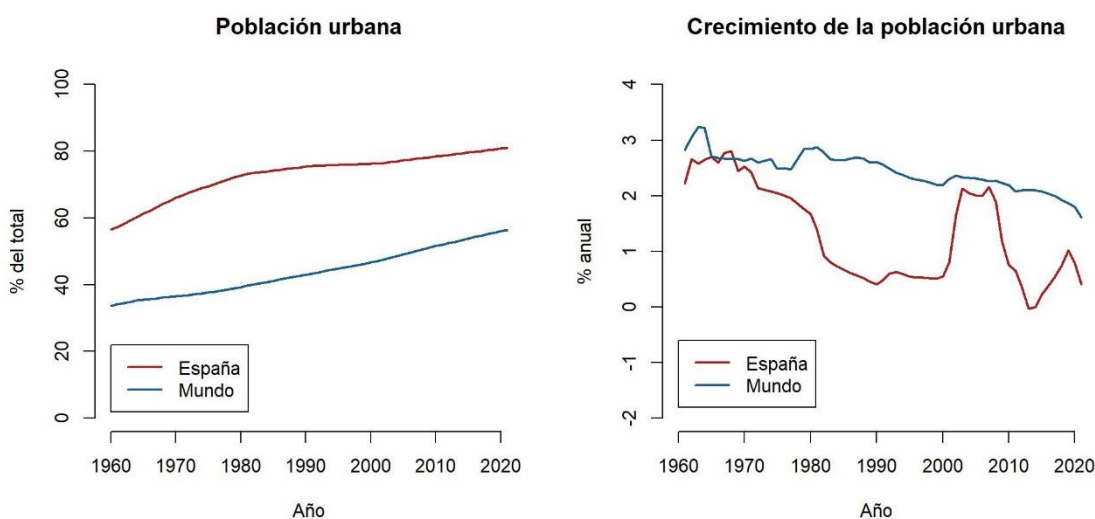


Figura 2. Evolución de la población urbana en España y en el mundo entre 1960 y 2020. Datos representados en porcentaje del total de población (izquierda) y porcentaje de crecimiento anual (derecha). Estimaciones del Banco Mundial basadas en Naciones Unidas - *World Urbanization Prospects* (2018).

Pero para entender en profundidad todos los aspectos que acompañan al crecimiento de las áreas urbanas ha de entenderse previamente el concepto de sistema urbano. Fernández Güell (2006) lo define como un «conjunto de asentamientos ubicados en un determinado territorio, creados y organizados por la sociedad que los habita, y que mantienen relaciones entre sí». Estos asentamientos a los que hace referencia dicho autor son las ciudades. Entendidas como una de las principales formas de organización material y social del conjunto de la población, las ciudades son consideradas sistemas funcionales organizados que cumplen una serie de funciones sociales tales como el hábitat, los servicios, la producción, el control físico y político del territorio, así como mediación entre grupos e individuos (Bretagnolle et al., 2009). En cuanto a sus componentes, estas pueden ser analizadas a través de sus elementos, sus funciones, su tamaño, su rango, sus flujos, sus relaciones funcionales respecto a otros núcleos urbanos, su entorno, el área de influencia que esta ejerce sobre otras o la red urbana que conforma (Fernández Güell, 2006). La perspectiva de las ciudades como sistemas complejos hace hincapié en las conexiones entre estos diversos componentes de la ciudad para identificar nuevas relaciones en la organización y la dinámica urbanas que también pueden permitir soluciones más acertadas y sostenibles (Alves Furtado et al., 2015). Así, tanto las ciudades como el propio proceso de urbanización plantean algunos de los mayores y más importantes retos para la comprensión de los sistemas sociales

humanos y para el diseño de políticas eficaces (UN-Habitat, 2009). Y es que, tal y como indica *World Cities Report* (2022) de *UN-Habitat*, el modelo de desarrollo urbano actual continúa siendo insostenible en numerosos aspectos, y es por ello por lo que la planificación urbana y territorial debe reforzarse de tal manera que estimule una mayor atención a las interrelaciones entre las zonas urbanas y rurales. Las ciudades no existen aisladas y los esfuerzos de planificación deben reflejar este hecho.

En la actualidad, los problemas que dificultan la adecuada evolución de los espacios urbanos requieren una adaptación y mejora de los métodos de planificación ya conocidos. Goodspeed (2020) identifica dos retos que deben afrontarse de manera urgente. Por una parte, la transformación hacia la ciudad sostenible y, por otra parte, afrontar la incertidumbre inherente a las decisiones humanas. Esto nos lleva a la siguiente pregunta: ¿cómo avanzar hacia modelos territoriales más sostenibles en la creación de nuevas expansiones urbanas? Para lograr un crecimiento urbano sostenible es de vital importancia diseñar e implementar instrumentos innovadores que apoyen la adecuada gestión de los espacios urbanos.

Numerosos estudios e informes abogan por la planificación de escenarios por su utilidad en tiempos de incertidumbre y complejidad (Amer et al., 2013; Zapata & Kaza, 2015). En el contexto de los sistemas urbanos, la planificación de escenarios hace referencia a un método creativo y exploratorio que considera diversos futuros de evolución enfocados a comprender la incertidumbre asociada a dichos sistemas (Chakraborty & McMillan, 2015). El informe titulado *Escenarios de los usos del territorio en Europa: análisis cualitativo y cuantitativo a escala europea* de 2009, elaborado por el Ministerio español de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino y la Agencia Europea de Medio Ambiente, integra el uso de escenarios, no para contemplar exclusivamente una evolución lineal de la tendencia, sino para identificar múltiples posibilidades futuras que permiten hacer frente a los grandes cambios que puedan acontecer. Esta herramienta ha sido ampliamente utilizada por gobiernos, organismos internacionales, empresas y otras entidades para explorar las posibles consecuencias, tanto de los cambios que pudiesen producirse en las fuerzas motrices que alteran el proceso de urbanización, como de las diversas estrategias implementadas. Su combinación con otros instrumentos de modelización y análisis espacial hace de este enfoque un método valioso para los científicos que desean comprender la evolución y dinámicas del proceso de urbanización. Dichos instrumentos de modelización se habían empleado tradicionalmente para simular o replicar tendencias pasadas. No obstante, para explorar diferentes futuros plausibles, es necesario integrar la planificación de escenarios con dichas herramientas. Combinadas, se consideran un instrumento de gran utilidad para el público en general, los políticos y los urbanistas, quienes pueden beneficiarse enormemente de la visualización de diferentes escenarios de crecimiento urbano (Berling-Wolff & Wu, 2004). En este contexto, la integración de la participación pública en estos instrumentos de planificación ha jugado un papel fundamental, demostrando su eficacia en la mejora de la elaboración de escenarios de usos del suelo (Volkery et al., 2008) o en el desarrollo de visiones futuras para diseñar políticas climáticas de transporte (Soria-Lara & Banister, 2017). Del mismo modo, los ejercicios de modelización, el análisis de escenarios y los enfoques participativos se han convertido en enfoques habituales para investigar el posible desarrollo futuro de las regiones en la investigación sobre sostenibilidad (Hewitt et al., 2014; Walz et al., 2007).

Pero para poder diseñar dichos escenarios futuros de crecimiento urbano es necesario entender cómo evolucionan los propios sistemas urbanos. En esta línea, los nuevos enfoques de planificación parten de la teoría de los sistemas complejos (Goodspeed, 2020), lo que permite contemplar la incertidumbre a partir del diseño de múltiples escenarios (Zapata & Kaza, 2015) y, concretamente, desde la simulación prospectiva a través de diversos instrumentos de simulación (Aguilera Benavente et al., 2010). A pesar de que los avances en los métodos que combinan la planificación de escenarios con modelos de simulación urbana hayan sido especialmente

significativos en las últimas décadas, aún permanecen sin resolver diversos aspectos que conciernen a los problemas que afectan a la planificación actual de ciudades y regiones. En primer lugar, aunque los escenarios son una técnica comúnmente empleada para combatir la incertidumbre (Hopkins & Zapata, 2007), estos no son suficientemente eficaces para responder a los problemas futuros si no son capaces de contemplar posibilidades más allá de lo esperable, sea o no deseable, sea o no imaginable. Sin embargo, los eventos disruptivos que afectan a la composición física y social de las ciudades (pandemias globales, guerras, crisis migratorias, catástrofes naturales, etc.) no suelen tenerse en cuenta a la hora de diseñar escenarios, lo que reduce su eficacia para cumplir su cometido. Por otra parte, para poder reproducir procesos o fenómenos urbanos más allá del crecimiento, los modelos de simulación deben contemplar todas las categorías posibles de usos del suelo urbano, representando funciones específicas de la ciudad como residencial unifamiliar, residencial multifamiliar u otras que contemplen la mezcla de residencia y comercio, por mencionar algunos ejemplos. Este hecho presenta un problema mayor ya que, para poder simular dichas funciones o usos del suelo, explorar los factores que explican su desarrollo se vuelve una tarea de especial dificultad que también se ha de resolver.

En este contexto, el empleo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha permitido afrontar numerosos retos que han ido marcando los sistemas urbanos a lo largo de su evolución. Concretamente, los SIG son herramientas que puede ser empleadas para analizar la estructura espacial del sistema urbano, incluyendo la distribución potencial de las ciudades, el análisis de las relaciones entre ciudades y la delimitación de subsistemas (Du, 2000). La posibilidad de abstraer dichos sistemas urbanos y sus relaciones a través de puntos, líneas y polígonos hace de los SIG una de las herramientas más adecuadas para su estudio, concretamente para el análisis territorial de los patrones que conforman los sistemas urbanos. Estos son el resultado de las interacciones de tres elementos básicos que caracterizan las ciudades: el plano, las edificaciones y los usos del suelo. Son, en definitiva, el resultado de repetidas modificaciones en la ocupación y organización espacial del suelo como consecuencia de las demandas de la sociedad a lo largo del tiempo (Mallick et al., 2023).

Dichas formas territoriales pueden representarse a través de geometrías fractales debido al elevado grado de correlación que presentan los patrones bidimensionales de dichas geometrías y la estructura de las ciudades (Batty & Longley, 1986). Este hecho ha incentivado el desarrollo y aplicación de los modelos de simulación de cambios en los patrones de los usos del suelo con el objetivo de avanzar ante las posibles consecuencias causadas por el proceso de urbanización (Aguilera Benavente et al., 2010). Concretamente los modelos basados en AC han tenido un impacto significativo en este campo gracias a su capacidad para reproducir patrones complejos similares a los que conforman los sistemas urbanos (Batty et al., 1997).


Desde el punto de vista de la planificación territorial, una de las aplicaciones con mayor potencial de los AC es su uso en simulaciones de crecimiento urbano a escala local y regional (Barredo et al., 2003). Para adaptarse al carácter dinámico, espacial y temporal que define los complejos sistemas urbanos, los AC han experimentado una importante flexibilización integrando mejoras en cuanto a la concepción de las relaciones espaciales basadas en la distancia, las categorías modeladas o la representación del espacio (Barreira González, 2017). Pero, para extraer todo el potencial de esta flexibilización y mejora de los modelos basados en AC, es necesario llevar a cabo una calibración y validación adaptadas a cada caso específico. De esta manera, el modelo se ajustaría a lo establecido por los diferentes escenarios futuros para ofrecer unos resultados más robustos y válidos conforme al método científico.

Estos avances, además de ofrecer ideas de evolución sobre cómo será la futura organización espacial de los usos del suelo de manera realista, hacen posible un análisis más preciso y detallado de la diversidad de usos del suelo y funciones de la ciudad, así como de los patrones derivados de los diferentes tipos de expansión urbana (Ritsema van Eck & Koomen, 2008). Por tanto, es posible

caracterizar la configuración y composición espacial para ofrecer un importante apoyo en la resolución de problemas territoriales asociados a las diferentes tipologías de expansión urbana (Aguilera et al., 2011; Liao et al., 2019). Sin embargo, la reciente proliferación de modelos de simulación que emplean conjuntos de datos vectoriales carece de métodos suficientes capaces de evaluar las características espaciales de estos escenarios generados de manera detallada. Este hecho deja sin explotar una fuente de información valiosa que, analizada en profundidad, podría ser un apoyo relevante en la toma de decisiones anticipada para lograr una planificación urbana adecuada.

Bajo este pretexto, se entiende que continuar con las tareas de adaptación de los modelos basados en AC a la simulación de escenarios urbanos disruptivos es una tarea pendiente, especialmente por la necesidad de adecuar dichos instrumentos a los nuevos requerimientos de la planificación urbana. Uno de los avances más significativos en este campo ha sido la integración de un entorno irregular en los modelos basados en AC para ofrecer un mayor nivel de detalle y realismo. En esta línea, la parcela catastral se emplea como unidad espacial de las características físicas y funcionales de la ciudad. Sin embargo, aunque esta configuración ha demostrado realizar simulaciones de elevada precisión (Barreira-González et al., 2015), las limitaciones en cuanto a las áreas urbanas simuladas les ha restado realismo. En este sentido, reducir el espacio simulado a una única área urbana o municipio ignora las numerosas relaciones externas e interacciones que se producen con otras aglomeraciones urbanas. La ciudad no puede ser estudiada de manera aislada. Los modelos de simulación del crecimiento urbano basados en AC a escala local y que emplean parcela como unidad espacial deben contemplar en su desarrollo la posibilidad de integrar los sistemas interurbanos, es decir, redes de ciudades interdependientes que mantienen flujos económicos, de bienes, capital y población, tales como Áreas Metropolitanas, Áreas Urbanas Funcionales o Corredores Urbanos. Este hecho se ha visto limitado, en cierto modo, por la capacidad computacional para procesar el grueso conjunto de datos que conforman estos espacios.

En este contexto se sitúa la presente tesis doctoral, que pretende avanzar en el uso de escenarios disruptivos en la planificación urbana e integrarlos junto con procesos de simulación novedosos basados en técnicas estadísticas y AC, así como en el empleo de métricas espacialmente explícitas para evaluar las características de los diferentes escenarios representados mediante conjuntos de datos vectoriales de elevado detalle y realismo. Este avance pretende ser un apoyo para afrontar los retos actuales que afronta la planificación de los espacios urbanos en un momento donde cada vez es más importante fomentar la gestión adecuada de estos sistemas para poder contribuir al bienestar humano y reducir la carga de los servicios ecosistémicos a todas las escalas (Bai et al., 2005).



«De una cosa estoy convencido: que la planificación urbana, para tener éxito debe ser, en buena medida, consecuencia de las condiciones del terreno y de los requerimientos de sus habitantes».

Raymond Unwin

Capítulo 02

HIPÓTESIS Y OBJETIVOS



CAPÍTULO 02



HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

2.1. HIPÓTESIS

La rápida urbanización plantea algunos de los retos más importantes que afrontan las ciudades del siglo XXI. Partiendo de esta premisa, y dado que los modelos basados en AC en combinación con las TIG y métodos estadísticos son herramientas adecuadas para describir y analizar las dinámicas territoriales provocadas por el crecimiento urbano y los cambios en los usos del suelo de las ciudades, se formula la siguiente hipótesis:

«La simulación prospectiva de escenarios disruptivos de crecimiento urbano mediante AC vectoriales, integrada con herramientas complementarias de creación de escenarios participativos y de evaluación de sus características espaciales, es un proceso clave para una comprensión integrada de la dinámica, el crecimiento y la organización de las ciudades bajo un contexto de elevada incertidumbre».

2.2. OBJETIVOS

A pesar de los esfuerzos para proporcionar información significativa sobre la simulación prospectiva del crecimiento urbano a escala local, siguen abiertas importantes lagunas en relación con la adaptación de las técnicas de calibración, simulación, validación y evaluación de escenarios futuros derivados de eventos disruptivos (Batty, 2020b; Karakiewicz, 2016). Esta tesis pretende cubrir estas carencias a través de los siguientes objetivos:

- **Objetivo 1.** Obtener una primera representación espacial de visiones futuras imaginativas y disruptivas relacionadas con los cambios en los usos del suelo urbano y los patrones de movilidad a través del empleo de metodologías de cartografiado participativo.
- **Objetivo 2.** Identificar los factores que explican el crecimiento de cada uno de los usos del suelo urbano para los diferentes escenarios disruptivos cartografiados mediante el desarrollo de un modelo de RLGP aplicable a conjuntos de datos vectoriales.
- **Objetivo 3.** Desarrollar un modelo de simulación basado en AC que emplee parcelas catastrales como unidad espacial, capaz de integrar múltiples usos del suelo urbano y que permita reproducir patrones y procesos urbanos disruptivos y realistas como el abandono de zonas urbanas o la sustitución del uso de ciertas parcelas urbanas por otros usos.
- **Objetivo 4.** Obtener simulaciones realistas de escenarios disruptivos mediante la integración de datos cualitativos derivados del taller de cartografiado participativo y datos cuantitativos obtenidos del modelo RLGP como parámetros de entrada del modelo.
- **Objetivo 5.** Evaluar espacialmente los escenarios futuros disruptivos simulados a través del empleo de métricas espacialmente explícitas calculadas a nivel de parcela catastral que permitan analizar patrones de diversidad y expansión urbana resultantes, así como evaluar el ajuste de las simulaciones a las narrativas.



Capítulo 03

MARCO TEÓRICO



CAPÍTULO 03



MARCO TEÓRICO

3.1. LA PLANIFICACIÓN URBANA. EVOLUCIÓN HISTÓRICA Y RETOS ACTUALES

La urbanización del territorio consiste en la conversión de terrenos rurales o espacios naturales en urbanos u otros usos edificados (Xu et al., 2007). Por su parte, la planificación trata de controlar y organizar la expansión de los asentamientos humanos para evitar y/o minimizar los impactos que tales desarrollos urbanos pudiesen generar si estos evolucionasen de manera espontánea. Además, trata de garantizar el bienestar de las personas y el adecuado desarrollo de las actividades económicas.

La planificación urbana y territorial es considerada una ciencia multidisciplinar relativamente reciente que trata de afrontar los problemas derivados del proceso de urbanización, fenómeno que representa un importante tipo de transformación del suelo. En este contexto, se ha de hacer una previa distinción entre el concepto de planificación urbana y planificación territorial. El primero, cuyo principal instrumento es el planeamiento urbanístico, tiene su foco en la ordenación de los espacios urbanos, definiendo los usos del suelo de dicho espacio. En el caso español, su área de actuación se corresponde con el término municipal. Por su parte, la planificación territorial presenta un nivel jerárquico superior, es decir, su foco de análisis es de ámbito regional/subregional, estableciendo la zonificación de espacios más extensos, que implican tanto ámbitos urbanos como no urbanos, y con una escala de detalle inferior. Así, dado que la escala difiere de un tipo de planificación a otro, se sobreentiende que su adecuada utilización en la aplicación de planes y proyectos para la ordenación y gestión de las áreas urbanas es un criterio clave en su distinción. Sin embargo, analizar la evolución de los patrones urbanos y los usos del suelo desde una única escala deja de lado aspectos esenciales a considerar. En los estudios realizados a escala local (urbana), son múltiples las ocasiones en las que no se tienen en cuenta las relaciones directas e indirectas de los municipios circundantes, a pesar de que el proceso de urbanización trasciende los límites preestablecidos. A escala regional/subregional (territorial), aunque si se tienen en cuenta las influencias transfronterizas representadas por las relaciones entre espacios urbanos y otros elementos territoriales, el nivel de detalle que proporciona no es suficiente para estudiar en profundidad algunas de las dinámicas urbanas. En diversas ocasiones, con el objetivo de integrar características de ambos tipos de planificación, se ha propuesto aplicar instrumentos de planificación a ámbitos metropolitanos o aglomeraciones urbanas (Aguilera Benavente et al., 2009, 2011; Valenzuela Montes & Soria Lara, 2011).

Tratando ahora de definir la planificación urbana desde un punto de vista más académico, Esteban Noguera (2011) la señala como una disciplina instrumental orientada al desarrollo de planes y proyectos que tiene como destino una colectividad. Peter Hall, en su obra *Urban and Regional Planning* (Hall, 2002), define la planificación urbana, también conocida como planificación espacial o planificación física, como un tipo de actuación o método sistemático con una componente geográfica, donde el objetivo general consiste en proporcionar una estructura

espacial de los usos del suelo que, de alguna manera, sea mejor que el patrón que existiría sin planificación. El resultado final de este proceso se traduce en el desarrollo físico o, en determinados casos, la decisión de no desarrollar el terreno.

En este contexto, uno de los aspectos claves para abordar adecuadamente dichas cuestiones consiste en la representación espacial de los patrones urbanos y las funciones y usos de la ciudad. Citando textualmente a Hall (2002), «*Es imposible pensar en este tipo de planificación sin una representación espacial, es decir, sin un mapa*». Esta idea es fundamental para establecer las bases en cuanto a las tareas de asesoramiento en la planificación urbana, donde gran parte del esfuerzo está dedicado a la reproducción de mapas de usos del suelo urbano para representar espacialmente escenarios de desarrollo urbano futuros. Esta componente temporal también es visible en otras definiciones como las dadas por Dror (1963) y Davidoff & Reiner (2008), quienes la describen como un proceso para determinar acciones futuras que guíen hacia el objetivo propuesto. De esta manera, se remarca la importancia de la planificación urbana como ciencia orientada hacia el futuro, es decir, destinada a crear soluciones de problemas tanto presentes, como aquellos que aún están por venir.

Por su parte, Fischler (2012) en su ensayo titulado *Fifty Theses on Urban Planning and Urban Planners* propone una base común de definiciones y principios para el ámbito del urbanismo. A su vez, menciona una serie de dualidades en su definición, que la hacen aún más compleja. En este contexto, destacan las siguientes:

- La planificación urbana como forma trans-histórica de acción social o como profesión moderna nacida a finales del siglo XIX.
- La planificación urbana como intento global de mejorar la vida urbana o como campo especializado de práctica centrado en el uso del suelo.
- La planificación urbana como diseño de espacios y lugares o como diseño de instituciones y procesos.
- La planificación urbana como actividad política o como actividad técnica.
- La planificación urbana como elaboración de planes para la comunidad o como deliberación por parte de la comunidad.
- La planificación urbana como resolución de problemas o como facilitación del planteamiento de problemas.
- La planificación urbana como ejercicio intelectual aislado o como experiencia vivida sobre el terreno.

Estas dualidades muestran la complejidad del proceso de planificación urbana y regional. Así, se observa que no solo es difícil de definir, sino también difícil de practicar. Para llevarla a cabo ha de implementarse a través de planes compuestos por políticas, programas de acción y diseños físicos. Estos se presentan generalmente de forma explícita mediante documentos formales. Dichos planes urbanos se aplican mediante proyectos de construcción (infraestructuras, espacios y edificios), normativas (directrices y requisitos), incentivos y desincentivos (monetarios y no monetarios) y asesoramiento (modelos, recomendaciones e información técnica) (Fischler, 2012). Esta última parte ha adquirido gran relevancia en el campo investigador. El asesoramiento y soporte a la toma de decisiones en planificación urbana mediante la generación de escenarios futuros simulados, así como el aporte de información técnica, precisa y refinada componen el foco de trabajo que se aborda a lo largo de estas líneas.

3.1.1. CONTEXTO HISTÓRICO DE LA PLANIFICACIÓN URBANA

Desde la aparición de los primeros asentamientos humanos se ha observado cierto interés por la organización, la estructura y el diseño de los elementos que los constituyen. Sin embargo, no fue hasta la revolución industrial cuando surgieron los primeros mecanismos reguladores de la expansión urbana para corregir el impacto ambiental, los problemas sociales y el caos estructural de la propia ciudad (Fernández Güell, 2006).

A mediados del siglo XIX, y en un contexto histórico de liberalismo político, se produjeron cambios revolucionarios que transformarían el estilo de vida de la sociedad. Las nuevas formas de transporte y comunicaciones, ligadas a las innovaciones urbanas como las mejoras en los sistemas de abastecimiento de agua, saneamiento e iluminación, las nuevas corrientes arquitectónicas y los significativos avances en el instrumental técnico de ordenación urbanística marcaron un periodo desarrollista que se extendió hasta el último tercio del siglo XIX.

Los problemas sociales y territoriales derivados de la elevada densidad de población de las ciudades durante esta época fue un claro precedente en el cambio del modelo de crecimiento de las ciudades. Los ensanches se presentaban como la forma más adecuada de extender la ciudad extramuros y liberarla de dichos problemas (de Terán, 1999). Estos se organizaban sobre una retícula ortogonal que presentaba manzanas rectangulares, aunque no iguales. Se caracterizaban por una traza urbana planificada y un incremento del mobiliario urbano, de servicios públicos y de áreas verdes (Juan Calatrava, 2016). En este contexto, una de las obras que marcó los principios básicos del urbanismo moderno fue la renovación del Plan de París encargada por *Napoleón III* a *Georges-Eugène Haussmann*. Su estructura urbana se caracterizaba por largas avenidas y bulevares que presentaban un orden jerárquico superior a la trama antigua sobre la que se superponían. Destacan también dos proyectos que marcaron este periodo urbanístico. En 1859 fue aprobado por el Gobierno el proyecto definitivo de *Ildefonso Cerdá* para el ensanche de Barcelona. Poco tiempo después, mediante un Real Decreto se aprobó en 1860 el proyecto de *Carlos María de Castro* para el ensanche de Madrid, el cual condicionaría la configuración del crecimiento de la ciudad durante décadas. Otras ciudades como Nueva York, Ámsterdam o Atenas son claros ejemplos de esta transformación urbanística decimonónica.

Este proceso de transformación y renovación urbana, ligado al fuerte crecimiento demográfico, también trajo consecuencias adversas. En numerosos casos provocó una importante especulación de la vivienda y una falta de control urbanístico, lo que derivó en el desplazamiento de los habitantes que residían en el centro de las ciudades hacia barrios obreros periféricos, marginando a la clase trabajadora con bajo poder adquisitivo. Este movimiento social y urbanístico generó una dualidad en la ciudad marcado por importantes diferencias entre el espacio planificado de la burguesía, es decir, los ensanches y, por otra parte, el espacio espontáneo y no planificado del extrarradio de la ciudad, los barrios obreros (Hall, 1996).

Esta acelerada expansión urbana que estaban experimentando las grandes metrópolis industriales de la época dio lugar al desarrollo de nuevos movimientos urbanísticos entre finales del siglo XIX y el siglo XX, condicionados además por el surgimiento de diferentes corrientes epistemológicas (Lois et al., 2012). La Ciudad Lineal de *Arturo Soria y Mata* estaba considerada como una utopía donde el transporte colectivo constituía el eje vertebrador que rediseña las ciudades hacia la linealidad (figura 3). Otro de los movimientos urbanísticos más destacados fue la Ciudad Jardín de *Ebenezer Howard* que pretendía descongestionar el Gran Londres. Esta idea trataba de afrontar el caos de las grandes ciudades postindustriales, donde se observaban importantes desplazamientos del campo a la ciudad, situaciones de pobreza, insalubridad, segregación social, etc. Esta idea de ciudad, que defendía los principios de igualdad social y autosuficiencia estaba organizada según un conjunto de anillos concéntricos separados en sectores que organizaban

todas las funciones de la ciudad, incluyendo espacios reservados para zonas verdes o espacios agrícolas y limitando el tamaño de la población (figura 4).

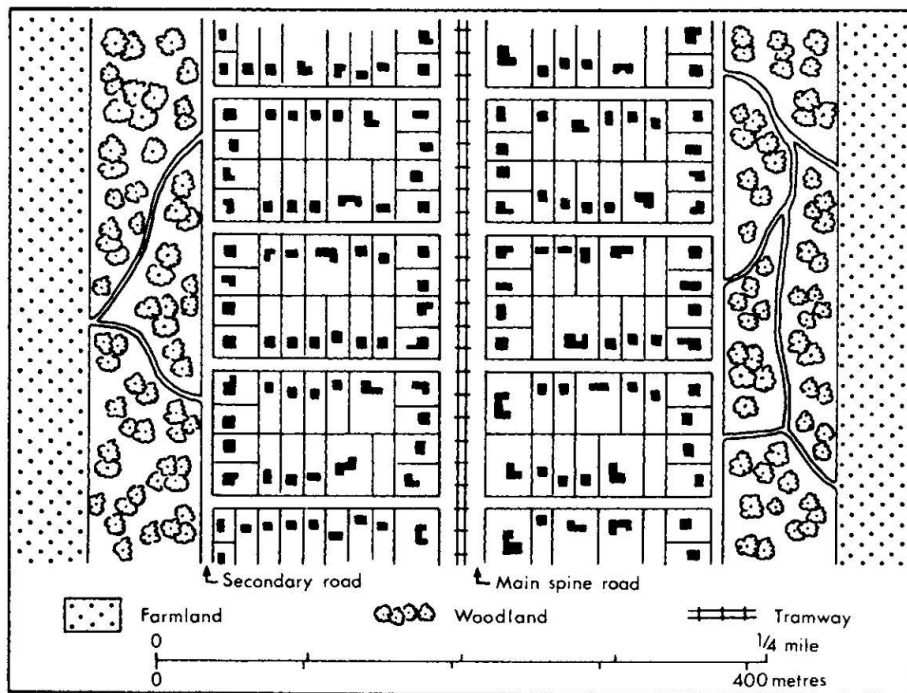


Figura 3. Boceto de la *Ciudad Lineal* diseñada por el arquitecto español *Arturo Soria y Mata*, basado en un sistema central de transporte. Fuente: Hall (2002).

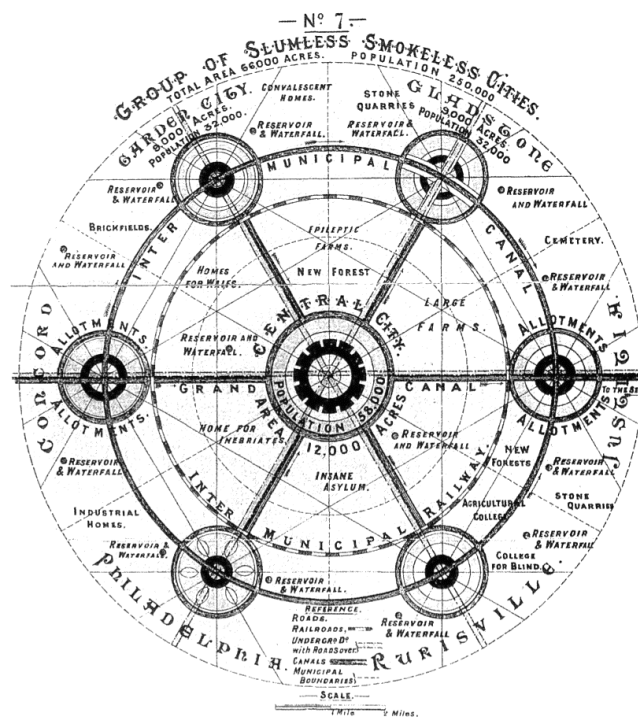


Figura 4. Diagrama de la primera edición del libro de Ebenezer Howard que representa el modelo de la idea de las ciudades jardín agrupadas en aglomeraciones urbanas planificadas. Fuente: Hall (2002).

No obstante, los primeros planes de urbanismo propiamente dichos tuvieron lugar a partir de la década de 1920-1930 en Estados Unidos y Europa (Fernández Güell, 2006). Así, tras la I Guerra Mundial, destacan algunos movimientos urbanísticos importantes como la Viena Roja (Neurath & Gómez Ramos, 1993), un plan de vivienda pública implementado por el gobierno que pretendía solucionar el grave problema de la vivienda.

En 1933 se celebra el cuarto congreso de la CIAM (Congreso Internacional de Arquitectura Moderna), una organización fundada por *Le Corbusier* centrada en el urbanismo y la arquitectura racionalista (Lois et al., 2012). Su importancia reside en la denominada Carta de Atenas (Gold, 2019), un documento que criticaba la ciudad del siglo XIX y defendía la ciudad como espacio funcional destinado a la residencia, el trabajo, la recreación y los desplazamientos. Esta idea de ciudad funcional fue operada a través de tareas de zonificación, estableciendo una importante separación entre las distintas funciones de la ciudad. Algunos ejemplos derivados de este enfoque son Chandigarh, diseñada por *Le Corbusier* (Fitting, 2002) y Brasilia, diseñada por *Oscar Niemeyer* y *Lucio Costa* (Rodrigues da Silva, 2015).

A mediados del siglo XX, tras la II Guerra Mundial, se inició un periodo de notable expansión urbana donde los planificadores tomaron un papel relevante. La necesidad de reconstruir las ciudades destruidas durante el conflicto bélico, unido a los importantes avances en la mecanización de la agricultura, la popularización del automóvil y el incremento de infraestructuras de comunicación marcaron este periodo desarrollista (Diefendorf, 1989; Fernández Güell, 2006; Levy, 2016). En este contexto, surgen nuevas ideas de planificación como las *new towns* británicas (Madge, 1962) y las *ciudades satélite* (Graham Romeyn, 1915), que pretendían descongestionar las grandes urbes. Aunque con cierta autonomía, las *ciudades satélite* dependían de la ciudad central más próxima respecto a trabajo y ocio, y estaban comunicadas por una importante red de transporte por carretera y ferrocarril. Algunos de los planes destacados de la época son el Plan General de Estocolmo de *Sven Markelius* (1945-1952) y Tapiola, la primera ciudad satélite de Helsinki (1952-1956). En Francia destacaron las *villes nouvelles* creadas por el Plan Regional de París de 1965.

Otro hito histórico que marcó la tendencia de los planes urbanísticos en Europa fue el modelo de Bolonia (Sevilla Buitrago et al., 2014). Aunque había una corriente despreocupada por los centros históricos de las ciudades ante la difícil adaptación de estos a las nuevas necesidades del urbanismo moderno, otras corrientes internacionales optaban por proteger y recuperar estos espacios llenos de historia (Lois et al., 2012). Así, tras la Carta de Venecia de 1964 (Javier & Morales, 2016), el patrimonio de las ciudades comenzó a adquirir una mayor importancia en los planes urbanos, dando paso a los conceptos de rehabilitación y reutilización en el urbanismo. La ciudad de Bolonia fue un precedente en la planificación europea en asegurar la preservación del futuro de las ciudades históricas.

Entre las décadas de 1960 y 1980 la planificación urbana sufrió una importante crisis. Un importante movimiento social, iniciado por *Jane Jacobs* (Jacobs, 1961), acometió contra las estrategias urbanísticas de la época, criticando las tareas de renovación urbana y de limpieza de barrios marginales al no priorizar las necesidades de los habitantes de la ciudad. Dicho enfoque ponía el foco en los ciudadanos, resaltando un modo de planeamiento de tipo bottom-up. De forma paralela, surge el urbanismo verde, un enfoque interdisciplinar que hace todo lo posible por minimizar el uso de energía, agua y materiales en cada etapa del ciclo de vida de la ciudad (Lehmann, 2011).

A finales del siglo XX, se incrementa la desconfianza de los métodos de planificación tradicionales, provocada por la ineficiencia de estos para solucionar los nuevos problemas que causaba la inexorable expansión urbana del momento. Los planes debían ser más flexibles. La evolución de las ciudades se traducían en un incremento exponencial, mientras que los planes no

lograban adaptarse a dicha evolución. En esta línea, López de Lucio (1993) resaltaba la necesidad de una planificación con una capacidad organizativa y proyectual mayor que aquella que caracterizaba los instrumentos del pasado, para afrontar adecuadamente los problemas del presente. Sin embargo, los fundamentos sobre los que se sustentaba la planificación no eran estables en el tiempo, por lo que se requerían continuas actualizaciones para abarcar los nuevos problemas emergentes. Dicho autor menciona tres condiciones que debían garantizarse para un desarrollo urbano adecuado a finales del siglo XX y que, actualmente, siguen presentes. Estas consisten en establecer una densidad y calidad de infraestructuras adecuada, calidad ambiental y capacidad de innovación.

En el siglo XXI, bajo un contexto de globalización, se readaptan los enfoques de planificación donde los urbanistas comienzan a incrementar el interés por la preservación del entorno natural, la restauración y conservación de los centros históricos de las ciudades, el uso del transporte colectivo y la búsqueda de una ciudad compacta en contraposición a la ciudad dispersa. Surgen así nuevos enfoques de reconfiguración de la estructura de la ciudad para fomentar un desarrollo más sostenible como las supermanzanas (Eggimann, 2022) (figura 5) o la ciudad de los 15 minutos (Carlos Moreno, 2023). En un marco de urbanización acelerada, la planificación de este nuevo siglo trata de repensar la ciudad para afrontar algunos de los retos globales más acuciantes como la globalización, el cambio climático, el cambio tecnológico y el cambio acelerado de las diferentes estructuras sociales.

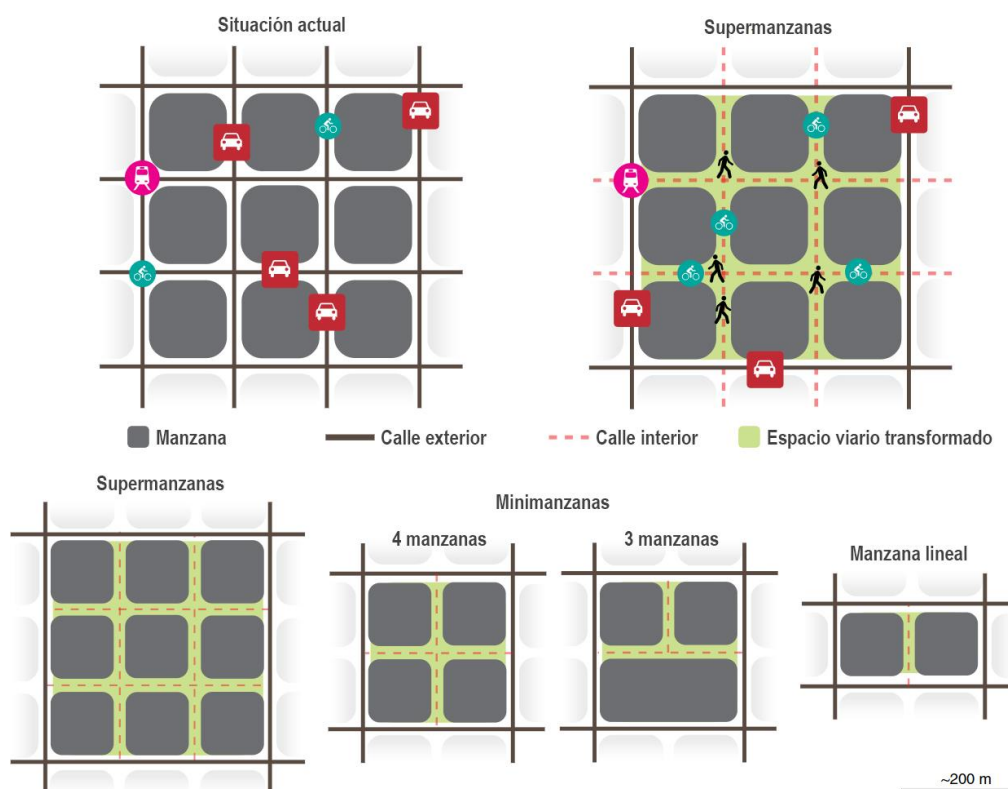


Figura 5. Esquema del diseño de distintos tipos de supermanzanas caracterizadas por calles exteriores que rodean las manzanas urbanas y la transformación del espacio interior de las calles.

No obstante, a pesar de los objetivos y retos planteados por el nuevo urbanismo, continúan existiendo carencias en este ámbito. Y es que, a medida que las ciudades se hacen más complejas, los planes también lo han hecho al intentar adaptarse a estas. Pero esta complejidad que acompaña

a los planes urbanísticos causa dificultades en cuanto a la comprensión de sus contenidos, así como a su tramitación y aplicación (Benabent-Fernández de Córdoba, 2019). Este es un problema que caracteriza a la planificación urbana del siglo XXI. Concretamente, en el caso español, la obsolescencia de planes ha limitado la capacidad de establecer una visión global de largo alcance para alcanzar un futuro deseado para las ciudades (Lobato-Becerra, 2020). Dicha cuestión permanece vigente en la actualidad y se desea dar una solución de manera urgente.

3.1.2. RETOS ACTUALES DE LA PLANIFICACIÓN URBANA

Como se ha podido observar en el apartado anterior, la idea de lo que se concibe como ciudad ideal ha ido variando a lo largo de la historia. Así, las distintas corrientes urbanísticas han tratado de adaptarse a las necesidades que la sociedad ha requerido en cada momento histórico, afrontando los problemas que se derivaban de la evolución y la distribución espacial de la población, así como de sus actividades. Por su parte, los retos que afronta la planificación urbana contemporánea son muy numerosos en la literatura científica. Entre ellos, encontramos algunos como la búsqueda de soluciones para afrontar el cambio climático y la escasez energética (Wegener, 2013), el adecuado control de la dispersión urbana (Polidoro et al., 2012), la integración de la ecología en los planes para lograr un paisaje urbano resiliente y sostenible (Ahern, 2013), lograr resultados de conservación de la biodiversidad más eficaces en las ciudades (Aronson et al., 2017), la implementación de vehículos autónomos en las ciudades y la adaptación de la población y el entorno urbano a estos (Gavanas, 2019) o diseñar una agenda de salud pública urbana haciendo frente a las disparidades sanitarias territoriales (Corburn, 2004). Desde un punto de vista más crítico y con una visión más centrada en los países en desarrollo, Ichimura (2003) identifica como reto proyectar y construir las infraestructuras y servicios necesarios (viviendas, transporte público, abastecimiento de agua, gestión de residuos, etc.), anticipándose al avance del éxodo rural que podría llegar a sofocar a las aglomeraciones urbanas existentes.

Por otra parte, haciendo referencia a un caso europeo, Kaczorowska et al. (2016) presentan algunos de los retos que implica la planificación, en este caso, de los usos del suelo en países con una situación en la que se dispone de datos científicos, se aplican políticas ambiciosas y se planifican varios proyectos de desarrollo críticos. Se toma como caso de estudio Estocolmo:

- Incrementar la cantidad y diversidad de datos y análisis necesarios para validar la planificación y la política regionales a nivel local;
- Diseñar herramientas científicas para afrontar la complejidad de los sistemas interactivos en las escalas y contextos pertinentes;
- Evitar el efecto retardado en la elaboración de políticas, la concienciación pública y la acción que se produce tras la obtención de conocimientos adecuados por parte de los responsables de la toma de decisiones.
- Aprovechar las diferencias respecto a los valores o puntos de vista de las partes interesadas durante el proceso de mediación para lograr una toma de decisiones más completa y evitar conflictos.

Tales retos están planteados bajo el contexto de los servicios ecosistémicos en la planificación de los usos del suelo urbano. Por su parte, desde una visión más amplia y centrada al tema principal de esta sección, Goodspeed (2020) identifica dos retos que afronta la planificación urbana actual (figura 6): como adaptar los planes para convertir las ciudades en entornos sostenibles y como atender la incertidumbre de fuerzas externas como el cambio climático o las disrupciones tecnológicas.

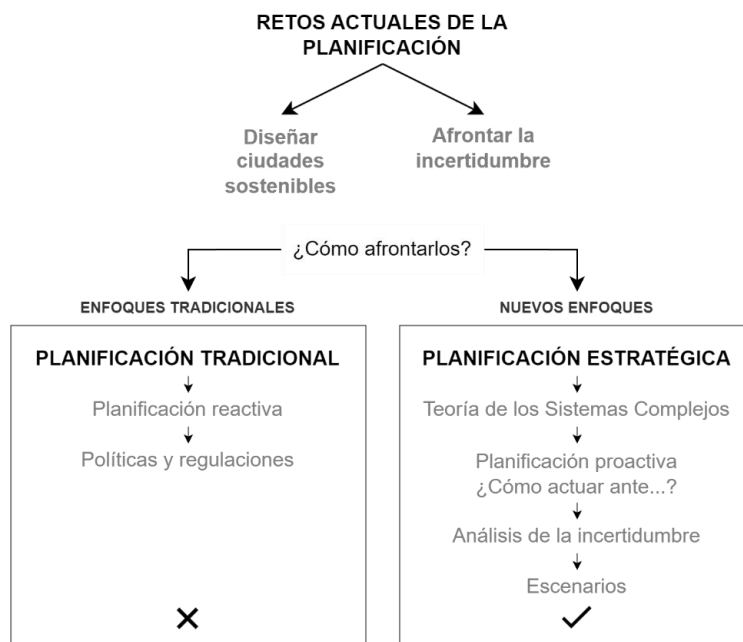


Figura 6. Retos de la planificación actual y cómo afrontarlos. Esquema basado en Goodspeed (2020).

Históricamente, desde el surgimiento de los primeros planes de regulación de los espacios urbanos se había llevado a cabo una planificación reactiva, es decir, aquella que integraba un conjunto de regulaciones y políticas de actuación efectuadas tras presenciar el problema que se pretendía mitigar. Esta planificación tradicional sufrió una importante crisis a finales del siglo XX debido a la ineficiencia de sus métodos para solucionar la expansión urbana acelerada que estaba presenciando la llegada del nuevo siglo. Ante tal situación, si se pretendía abordar los actuales retos de planificación, se debían romper los lazos establecidos con los enfoques tradicionales de la planificación más conservadora.

Como consecuencia, la planificación estratégica comenzó a adquirir relevancia en la gestión y diseño de los espacios urbanos, aunque fue primero introducida en el sector de los negocios a mediados de la década de 1950 (Steiner, 1979). Era también conocida como planificación a largo plazo (*long-range planning*). De esta forma, dado que la planificación debe afrontar la futuridad de las decisiones tomadas, la planificación estratégica examina las consecuencias de causa y efecto a lo largo del tiempo de las decisiones previstas que se van a asumir, buscando actuaciones alternativas para los diversos caminos que podría tomar el futuro (Steiner, 1979). La planificación estratégica, aplicada al contexto territorial, parte de que los sistemas urbanos son sistemas complejos y que, por tanto, debe tratarse considerando la incertidumbre. Es, por tanto, un tipo de planificación proactiva que, a partir de la descripción, análisis y evaluación de diferentes caminos posibles que puedan tomar los sistemas urbanos, se diseñan diferentes métodos de actuación para estar preparados ante un amplio abanico de posibilidades.

Sin embargo, en España, su integración aún no ha madurado por completo. El modelo de plan que presenta la Ley sobre Régimen del Suelo y Ordenación Urbana actual no presenta grandes diferencias respecto a la de 1956, caracterizada por una naturaleza reguladora (Benabent-Fernández de Córdoba, 2019). En suma, aun continua vigente un sistema poco flexible, regulado por un plan que no puede afrontar las incertidumbres externas, y que difícilmente puede adaptarse a los posibles cambios futuros a través de su instrumento principal: el Plan General de Ordenación Urbana (PGOU). Esta breve contextualización de caso presenta un importante reto: adaptar e integrar la planificación estratégica al sistema urbanístico español para alcanzar los objetivos planteados basados en el diseño de ciudades sostenibles y el afrontamiento de la incertidumbre.

En palabras de Benabent-Fernández de Córdoba (2016): *«De lo que se trata, por tanto, es de cómo incorporar la incertidumbre de la vida real en la planificación, cómo hacer posible que los planes no sean obsoletos al poco tiempo de su adopción, cómo evitar su rigidez y su aparente y ficticia solidez para hacerlos duraderos».*

3.2. LOS ESCENARIOS EN LA PLANIFICACIÓN URBANA

3.2.1. EL PENSAMIENTO FUTURO

Cada vez que se trata con la incertidumbre de la vida real, se está realizando un ejercicio de pensamiento futuro (Carsjens, 2009). De este modo, aquellas decisiones que se tomen para controlar u organizar un proceso dinámico que evolucione en el tiempo van a desarrollarse en un contexto futuro que no se conoce con exactitud. Desde esta perspectiva también puede abordarse la planificación urbana. En este sentido, una planificación urbana orientada hacia el futuro trata de plantearse cómo van/pueden/deben evolucionar las dinámicas territoriales del proceso de urbanización.

En algunas disciplinas científicas este hecho no es tan problemático. Determinadas ciencias experimentales se encuentran sometidas a niveles de incertidumbre asumibles o relativamente bajos, es decir, las variables explicativas del fenómeno en cuestión se rigen por leyes universales u otro tipo de reglas bien conocidas, lo que facilita realizar predicciones de dicho fenómeno. Bajo este pretexto, se puede afirmar que conocer los factores explicativos de un fenómeno es sinónimo de predecirlo. Sin embargo, cuando el ser humano interviene en un fenómeno o proceso, la determinación de las variables explicativas se vuelve una tarea de gran complejidad, y la incertidumbre pasa a convertirse en una limitación difícil de manejar (Soros, 2013). Tratar de conocer todos los aspectos que intervienen en un fenómeno afectado por un número inabarcable de factores, siendo algunos de ellos difíciles de identificar, se ha convertido en un reto para los investigadores enfocados a explorar la evolución de los sistemas urbanos. A pesar de ello, esta tarea es necesaria e inherente a todo proceso en el que intervienen las decisiones humanas, como es el caso del proceso de urbanización. Surgen, bajo estas premisas de incertidumbre asociadas a la planificación territorial, una serie de cuestiones:

- ¿Se conocen todos los factores explicativos de la distribución de usos de suelo que configuran las áreas urbanas?
- ¿En qué medida cada uno de estos factores explicativos afecta a la evolución de estas áreas?
- ¿Están sometidas las dinámicas territoriales a leyes naturales o, por el contrario, se encuentra influenciadas por elementos o procesos difíciles de comprender mediante un enfoque determinista?

Esta serie de cuestiones, entre otras de la misma índole, han abierto un nuevo camino de pensamiento futuro. Las predicciones empleadas en los sistemas complejos no han demostrado ser el instrumento más adecuado para explicar su evolución futura. En esta línea puede señalarse un caso cercano a la ineficacia de los métodos predictivos en la planificación territorial. Entre 1997 y 2006 España experimentó un desarrollo urbanístico sin precedentes, tanto por su intensidad como por la duración de este (Burriel de Orueta, 2008). Esta época de prosperidad para el sector de la construcción fue un claro indicador para los planificadores, en el sentido de que recalca la necesidad de ajustar las demandas de suelo de los Planes Generales de Ordenación Urbana (PGOU) a un contexto de gran crecimiento. Sin embargo, estas previsiones integradas en los planes de los años previos a la crisis económica de 2008, derivada de la burbuja inmobiliaria, no reflejaría la situación real que experimentarían los municipios españoles años después.

De esta forma, realizar predicciones basadas en trayectorias pasadas puede llegar a invalidar por completo las acciones y esfuerzos tomados durante el proceso de planificación. Los modelos predictivos dejan de lado la incertidumbre inherente a los sistemas urbanos complejos, haciéndolos especialmente ineficaces en la comprensión de la evolución territorial de ciudades y regiones. Con la idea de afrontar tal problemática, los métodos basados en la imaginación de futuros posibles se han introducido como una alternativa viable, los cuales ya han sido aplicados por empresas y otros sectores a una gran variedad de materias (Schoemaker, 1995). Este pensamiento estratégico, que trata la incertidumbre a través de la prospectiva, permite pensar en el futuro desde diferentes perspectivas, y no únicamente desde el punto de vista más previsible (Barreira-González et al., 2015).

3.2.2. TIPOS DE ESCENARIOS Y ENFOQUES DE PENSAMIENTO FUTURO

Para lograr prácticas de planificación más efectivas se ha resaltado la necesidad de un pensamiento prospectivo que trate el pensamiento futuro mediante diferentes posibilidades de evolución, o lo que se también se conoce como escenarios. Una de las investigaciones referentes en cuanto a los escenarios y sus tipologías los define desde dos puntos de vista: como posibles estados futuros y como descripciones de la evolución de fenómenos (Börjeson et al., 2006). Es posible encontrar definiciones más detalladas en autores como van der Heijden (2000), quien los concibe como herramientas para investigar la propia comprensión del mundo, con el objetivo de desafiar el propio modelo mental del futuro. Por su parte, Beach (2021) presenta los escenarios como narrativas sobre futuros alternativos que permiten imaginar lo que podría ocurrir en lugar de lo que se espera que ocurra.

Dado que los escenarios son aplicables a cualquier campo relacionado con procesos o eventos dinámicos y/o temporales, su conceptualización puede llegar a ser muy amplia. Amer et al. (2013) hacen una revisión de la planificación de escenarios, identificándolos como una herramienta valiosa que ayuda a las organizaciones a prepararse para posibles eventualidades, haciéndolas más flexibles e innovadoras, es decir, constituyen un esquema de los aspectos del futuro más relevantes (Aguilera Benavente et al., 2010).

En todas las cuestiones tratadas anteriormente se ha podido observar como denominador común la presencia de la componente temporal, es decir, la perspectiva de futuro. Esta es un elemento indispensable en planificación. En esta línea, si todo estudio futuro está sujeto a un importante grado de incertidumbre ¿cómo se debe actuar ante la falta de certeza? Partiendo de que la incertidumbre es una característica que no puede ser eliminada en su totalidad, el enfoque más adecuado consiste en minimizar su impacto mediante el empleo de escenarios futuros en planificación o *Scenario Planning*. Este consiste en un método estratégico que genera múltiples escenarios plausibles para un determinado sector, elaborando posteriormente planes en torno a estos futuros múltiples (Zapata & Kaza, 2015). Ha sido uno de los enfoques más extendidos para abordar la incertidumbre. Adquirió popularidad en la década de 1970, cuando se observó su éxito en la compañía petrolera *Shell* durante la crisis del petróleo (Schwartz, 1996; van der Heijden, 2005; Zapata & Kaza, 2015).

En este contexto, la construcción de escenarios ha adquirido gran relevancia como instrumento de planificación en la ordenación del territorio, constituyendo un paso esencial en la preparación de la fase de planificación (Gómez Orea & Gómez Villarino, 2013). Y, aunque este enfoque instrumental se ha integrado adecuadamente en la teoría de la planificación urbana, no ha sido de tal modo en la práctica. La crisis que ha experimentado el plan como instrumento de planificación ha abierto paso a este tipo de métodos de diseño futuro, tal y como señala Benabent-Fernández de Córdoba (2019). Dicho autor, además, recalca la mala adaptación que el tradicional

instrumento presenta ante los cambios acelerados del territorio. Así, la integración de la planificación espacial de escenarios en el proceso metodológico de elaboración de planes urbanos es aún más relevante (Aguilera Benavente et al., 2011).

Para una adecuada integración de estos métodos en la práctica, la planificación de escenarios ha logrado integrar enfoques prospectivos. A través del uso de escenarios, la prospectiva trata de allanar el camino planteándolo desde un enfoque futuro, y no desde una perspectiva basada únicamente en el pasado (Gómez Orea & Gómez Villarino, 2013). Utilizando el presente como punto de partida, se presentan futuros probables, posibles o deseables, que nos hacen plantearse cómo van, pueden o deben ser. En relación con ello, y dentro del enfoque prospectivo, se identifican tres modos de pensamiento futuro principales: el pensamiento predictivo, el pensamiento exploratorio y el pensamiento normativo (Börjeson et al., 2006). Derivado de estos modos de pensamiento basados en la conceptualización del futuro se distinguen diferentes tipos de escenarios. Las categorías que constituyen la base de los escenarios propuestos por Börjeson et al., (2006) y que se observan en la tabla 2 se describen a continuación:

- Los **escenarios predictivos**, como indica su propio nombre, tratan de predecir que va a ocurrir en el futuro. Buscan el camino más certero de acuerdo con la situación que se espera que ocurra. En este sentido, el concepto de probabilidad juega un papel importante.
- Los **escenarios exploratorios**, de igual modo, exploran situaciones posibles que pueden ocurrir en el futuro, partiendo de diversas perspectivas.
- Los **escenarios normativos** se centran en establecer una serie de directrices que guíen a alcanzarlos.

Tabla 2. Resumen de los aspectos clave según los tipos de escenarios.

Categoría	Cuestión	Tipo	Pregunta que trata de responder
Predictivos	¿Qué ocurrirá?	Previsión	¿Qué ocurrirá si se produce la evolución prevista?
		What if...?	¿Qué ocurrirá si... se producen determinados acontecimientos?
Exploratorios	¿Qué puede ocurrir?	Externo	¿Qué puede ocurrir con el desarrollo de factores externos?
		Estratégico	¿Qué puede ocurrir si actuamos de una determinada manera?
Normativos	¿Cómo puedo alcanzar un determinado objetivo?	De preservación	¿Cómo puede alcanzarse el objetivo ajustándolo a la situación actual?
		De transformación	¿Cómo alcanzar el objetivo cuando la estructura imperante bloquea los cambios necesarios?

Los escenarios predictivos, concretamente las previsiones, han sido fuertemente criticadas ante la demostración de su ineficiencia en numerosas ocasiones, lo que ha derivado en una mayor integración de los escenarios exploratorios y normativos en los estudios futuros. Ambos han sido utilizados en la simulación prospectiva de dinámicas y procesos urbanos (Aguilera Benavente et al., 2010), marco donde se sitúa la presente investigación.

Respecto a los escenarios normativos, se distinguen dos tipos. Por una parte, si para lograr los objetivos que se desean alcanzar no son necesarios cambios estructurales, los escenarios de preservación son los más indicados. Por el contrario, si se requieren cambios estructurales para alcanzarlos (como pueden ser aquellos referentes al cambio climático), los escenarios de transformación son los idóneos (Höjer et al., 2011). Estos últimos son especialmente frecuentes en situaciones donde el interés reside en explorar cómo alcanzar un objetivo específico, y no tanto en lo que se refiere a explorar diferentes caminos de desarrollo futuro. Este método, basado en el diseño de escenarios normativos transformadores, también se conoce como retrospectiva o *backcasting*. Soria-Lara & Banister (2018) lo identifican como una forma de construcción de escenarios en la que se adopta un punto de vista normativo sobre los futuros deseables y, a continuación, el método investiga los diferentes paquetes de políticas que pueden emplearse para alcanzar esos futuros y las vías alternativas que pueden seguirse. Este enfoque suele emplearse cuando la proyección futura tendencial, también denominada *Business as usual*¹ (BAU), ya no es apropiada (Akerman & Höjer, 2006; Soria-Lara & Banister, 2018a).

Por último, los escenarios exploratorios parten de una premisa diferente. Su interés no reside en establecer las directrices adecuadas para alcanzar un estado futuro del sistema concreto, sino en evaluar y analizar los estados posibles más significativos hacia los que podría evolucionar un sistema. Esto permite analizarlos y diseñar contramedidas de manera proactiva. Se trata, por tanto, de una forma de flexibilizar los instrumentos de planificación para adaptarlos a la incertidumbre asociada a los sistemas complejos. La figura 7 representa de manera esquemática este concepto donde, partiendo de la evolución pasada y teniendo en cuenta la tendencia, se plantean diferentes posibilidades que podrían ocurrir ante un cambio en la tendencia.

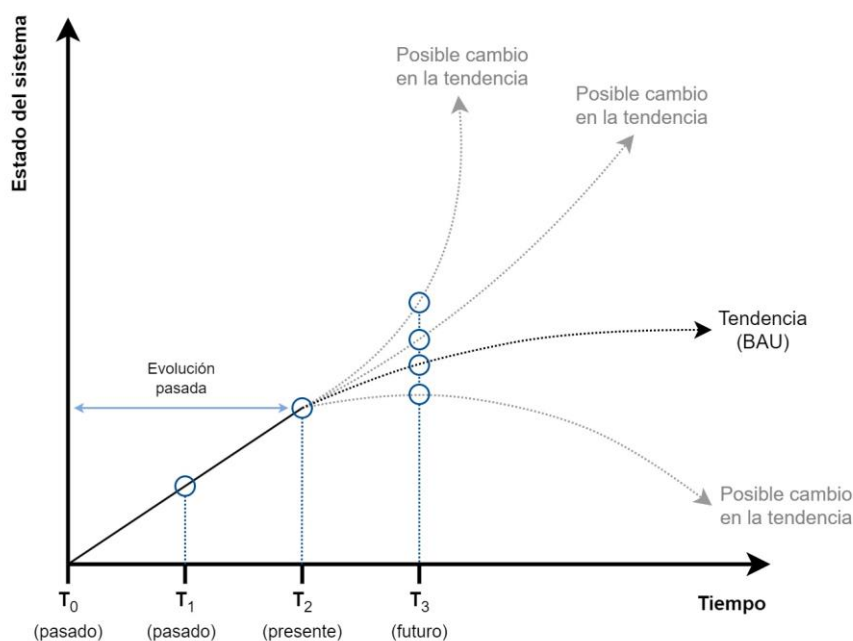


Figura 7. Posibles cambios en la tendencia de un sistema que justifican el uso de escenarios exploratorios. Extraído y adaptado de Barreira-González et al. (2015).

¹ Business as usual es un concepto que puede traducirse como negocios como siempre o como de costumbre. «Son escenarios donde se supone que no se producen cambios importantes y que las sociedades, la tecnología y la cultura evolucionan según una trayectoria continua desde el pasado hacia el futuro. Los escenarios BAU no tienen en cuenta la incertidumbre y la complejidad, mientras que el futuro es intrínsecamente incierto y la sociedad es intrínsecamente compleja y ambigua» (Vergragt & Quist, 2011).

Este tipo de escenarios han tenido una importante repercusión en las prácticas de planificación urbana, donde su uso ha aumentado debido al creciente interés en este ámbito (Avin et al., 2022; Avin & Goodspeed, 2020). Así, se observan trabajos dedicados a la creación de escenarios exploratorios de transporte y usos del suelo (Soria-Lara et al., 2021), o a simular este tipo de escenarios para representar diferentes estados futuros de crecimiento urbano (Barreira-González et al., 2015).

3.2.3. LOS ESCENARIOS DISRUPTIVOS

El concepto de disrupción es una característica cada vez más importante de la investigación de escenarios futuros (Batty, 2016, 2020b; Scheel & Rivera, 2013; Soria-Lara et al., 2021). Este concepto hace referencia a los cambios repentinos producidos en la tendencia, ya sean debidos a la innovación o a otro tipo de fenómenos fortuitos (Christensen, 1997). La aparición de eventos disruptivos provoca que aquellos procesos que precedieron al cambio no sean válidos como base para los modelos de predicción (Millar et al., 2018). Esta es una de las causas principales por la que los escenarios de tipo predictivo no han adquirido suficiente importancia en los estudios futuros.

Algunos ejemplos donde acontecimientos inesperados han invalidado las previsiones realizadas afirman esta teoría. Es el caso de la invención del automóvil como sustitutivo de los modos de transporte tirados por animales, o la crisis económica provocada por la explosión de la burbuja inmobiliaria que afectó a los PGOU. Este tipo de eventos, los cuales crean un punto de inflexión en la línea temporal establecida por la evolución tendencial, han sido especialmente frecuentes en las últimas décadas. Tan solo hay que echar la vista atrás unos años para vislumbrar algunos de ellos, como puede ser la pandemia global producida por el SARS-COV-2 (Antipova, 2021) o el conflicto bélico entre Ucrania y Rusia (Di Fiorino et al., 2022). De igual modo, aunque con una repercusión a distinta escala, la erupción del volcán Tajogaite en la isla de La Palma (España) también ha provocado una redirección en los planes territoriales preestablecidos.

Respecto a las consecuencias que podrían derivarse de estos eventos disruptivos en la planificación espacial de ciudades y regiones, surgen diversas cuestiones. En relación con la pandemia ¿cómo han resultado los desplazamientos de la población? ¿afecta la integración del teletrabajo a los hábitos de vida de la población? Por otra parte, los conflictos bélicos también derivan en una infinidad de preguntas de carácter social, humanitario, económico, político, urbanístico, etc. que afectan directa e indirectamente al conjunto de decisiones y actuaciones políticas prediseñadas. De igual modo, los desastres naturales provocan considerables daños humanos y estructurales, por lo que requieren ser tenidos en cuenta como escenarios plausibles en la planificación urbana y territorial. Batty (2020b) habla del nivel de disrupción que presentan algunas tecnologías urbanas y de los retos que puede plantear a futuro. En otro trabajo, plantea la cuestión de hasta qué punto las tecnologías de las ciudades inteligentes pueden alterar la forma en que estructuramos nuestras ciudades (Batty, 2016).

Así, a medida que evolucionan las ciudades, estas se hacen más complejas (Batty, 2020a) y, en consecuencia, el nivel de incertidumbre se incrementa. Este hecho deriva en la posible aparición de un mayor número de irrupciones o eventos difícilmente previsibles, incluso, difícilmente imaginables. Ante esta situación ¿son suficientes los escenarios de crisis, sostenibilidad y cambio climático, que aparecen en buena parte de los estudios de planificación territorial, para afrontar la incertidumbre a la que se encuentra sujeta la sociedad actual? Esta cuestión aun presenta grandes carencias, no obstante, la literatura científica está experimentando un cambio en la tendencia, observándose cada vez más investigaciones que plantean escenarios difícilmente imaginables, pero plausibles (Laird, 2014). Dentro de este ámbito teórico, la planificación del transporte en las

ciudades concentra gran parte de la atención. Las innovaciones tecnológicas, como pueden ser el desarrollo de los sistemas de conducción autónoma (Yigitcanlar et al., 2019) o la movilidad compartida (Ciari & Becker, 2017), son el principal foco de estudio.

Desde el punto de vista territorial, la planificación espacial está experimentando una cierta necesidad por incorporar este tipo de escenarios. Byrd et al. (2018) analizan los impactos de las disrupciones tecnológicas en el desarrollo futuro de la forma urbana, mientras que Scheel & Rivera (2013) tratan de identificar las características que provocan la aparición de puntos de inflexión disruptivos en la evolución de las ciudades. Por su parte, Soria-Lara et al. (2021) aplican metodologías de *visioning* para la construcción de escenarios futuros disruptivos de transporte y usos del suelo.

En el contexto de la planificación espacial, los enfoques participativos integrados en los procesos de creación de escenarios se encuentran fuertemente condicionados por el propio pensamiento de las comunidades. Como se ha definido antes, el proceso de *visioning* hace referencia a la fase participativa donde miembros de una comunidad hacen un esfuerzo de imaginación para visualizar diferentes posibilidades de evolución futura. Sin embargo, esta fase presenta tres barreras que reducen su propio valor estratégico (Soria-Lara et al., 2021). En primer lugar, algunos de los métodos tradicionalmente aplicados, como técnicas de consenso entre los participantes, limitan la capacidad para añadir ideas atípicas en las visiones futuras (Melander, 2018; Shiftan et al., 2003). En segundo lugar, los expertos que guían los experimentos de *visioning* frecuenta un campo de visión futura bastante reducido debido a dominio científico con el que están acostumbrados a tatar, lo que les induce a guiar a los participantes hacia un pensamiento lineal (Hickman & Banister, 2014). En tercer lugar, los ciudadanos tienden a expresar sus ideas basándose en hechos conocidos, derivando en un pensamiento tendencial.

Así, para lograr que acontecimientos inesperados pero plausibles sean contemplados en escenarios futuros es imprescindible realizar un esfuerzo de pensamiento disruptivo u *outside-the-box*. En este contexto, es frecuente considerar señales tempranas que advierten de la posible aparición de cambios en el sistema. Se identifican con el término *weak signals*. Según Saritas & Smith (2011), consisten en «*primeros indicios de cambios posibles, pero no confirmados, que más adelante pueden convertirse en indicadores más significativos de fuerzas críticas para el desarrollo, las amenazas y la innovación empresarial y técnica*». Además, para romper el pensamiento tendencial y ampliar el campo de imaginación hacia diferentes posibilidades futuras es importante incluir elementos perturbadores que reconfiguren las trayectorias de los acontecimientos y las situaciones durante el proceso de prospectiva (Saritas & Smith, 2011). Para cumplir con dicho objetivo se emplean los *wild cards*. Según Mendonça et al. (2004), los *wild cards* son «*descripciones de un suceso que se supone improbable, pero que tendría consecuencias importantes e inmediatas para las partes interesadas de la organización si este se produjera. Suele tratarse de sucesos graves, destructivos, catastróficos o anómalos y, en esencia, imprevisibles. Además, si un suceso de este tipo se produce con tanta rapidez y fuerza que un proceso de gestión normal y planificado no puede preverlo, la organización se vuelve especialmente vulnerable*». Su utilización estimula un pensamiento más disruptivo y, por tanto, permite la creación de escenarios disruptivos (Soria-Lara et al., 2021; Soria-Lara & Banister, 2018b).

Como se observa en la figura 8, el estado actual de un sistema puede evolucionar hacia un número no conocido de posibilidades. La evolución del sistema puede redirigirse involuntariamente como consecuencia de la aparición repentina de eventos disruptivos, pero también puede orientarse hacia determinadas situaciones bajo una adecuada toma de decisiones. En este sentido, la identificación de *weak signals* permite reducir el número manejable de direcciones que puede tomar el futuro, mientras que el planteamiento *wild cards*, además de favorecer un pensamiento

disruptivo, ayuda a considerar situaciones para las que la sociedad no estaría preparada si se basara únicamente en un pensamiento tradicional y/o conservador.

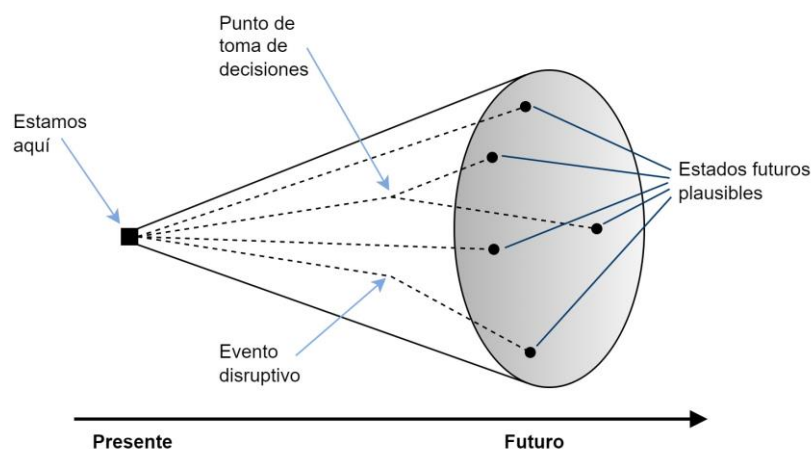


Figura 8. Cono de los escenarios (*Scenario funnel*). Extraído y adaptado de Timpe & Scheepers (2003).

La presencia de un pensamiento disruptivo en estudios sobre la planificación espacial de ciudades y regiones se encuentra limitada a un número de casos aún muy reducido. Es una tarea necesaria para los investigadores avanzar en el conocimiento de los estudios futuros y la prospectiva y, más concretamente, de los estudios que conciben la posibilidad de aparición de eventos disruptivos. Sin lugar a duda, los sucesos inesperados que pueden incidir en la evolución territorial actual son claros indicadores de esta necesidad.

3.2.4. LA CREACIÓN DE ESCENARIOS PARTICIPATIVOS Y SU REPRESENTACIÓN ESPACIAL

Como ya se ha indicado, una de las fases iniciales en el proceso de planificación de escenarios consiste en crear imágenes del futuro que sirvan como objetivo o guía para tomar decisiones en el proceso de planificación (Shipley, 2002). Esta fase de visioning involucra a menudo tareas de participación pública, y es vista como un ejercicio democrático que pretende comprometer a una amplia variedad de actores (Soria-Lara et al., 2021). Según indica Hopkins & Zapata (2007), este hace referencia a una estrategia relativamente reciente que se centra en lo que la comunidad participante considera más deseable en el futuro. Bajo esta premisa, se podría relacionar el concepto visioning con los escenarios normativos, ya que se centra en alcanzar un objetivo concreto, es decir, una situación deseada. No obstante, como fase esencial del proceso de planificación de escenarios, esta se entiende como un proceso participativo donde diversos actores, incluyendo a la comunidad, debaten y dialogan con el fin de establecer los fundamentos que definen los diversos futuros plausibles que puedan llegar a imaginar (Ariza-Álvarez et al., 2021).

Pero, a pesar de su importancia en este contexto, involucrar a la población en las tareas de planificación no es una tarea sencilla. Ya lo argumentaba Shipley (2002) indicando que una visión comunitaria creada de forma participativa es imposible o ineficaz. Esta afirmación la justifica ante los modelos de planificación tradicional y de carácter individual diseñados por *Hausmann*, *L'Enfant* o *Howard*. Se observa así la elevada complejidad de los sistemas urbanos, especialmente debido a su estructura física y social. Esta ha derivado en importantes dificultades para llevar a la práctica el proceso de *visioning* en numerosas ciudades europeas (Ache, 2000). Sin embargo, a

pesar de la complejidad que apuntan dichos autores en la integración de las partes interesadas en actividades colaborativas durante la planificación de escenarios, la participación pública ha ido adquiriendo mayor peso en las últimas décadas. Este hecho se observa en el creciente número de trabajos que integran la opinión de diversos actores, incluyendo a la población, en determinadas fases del proceso de planificación y, más concretamente, en la imaginación y diseño de futuros plausibles para la creación de escenarios. Chakraborty (2011) presenta los *Reality Check* (figura 9), ejercicios de tipo *visioning* basados en la realización de diversas actividades durante un único día. Su objetivo consiste en fomentar la participación de las partes interesadas y desarrollar escenarios centrados en la sostenibilidad regional a largo plazo. Por su parte, Soria-Lara & Banister (2017) utilizan diversas técnicas participativas como parte de la fase de *visioning*, destacando las entrevistas semiestructuradas y las encuestas realizadas con el método *Delphi*, las cuales fueron empleadas para generar visiones futuras sobre transporte basadas en la perspectiva de los participantes. Vervoort et al. (2012) emplean dos novedosas técnicas participativas de comunicación analítica y experimental para facilitar la visualización de las dimensiones conceptuales y las dinámicas de las historias narrativas futuras.

Estos ejemplos llevan a la conclusión de que poner en común los objetivos de las partes interesadas hace posible establecer coincidencias y diferencias entre ellos, lo que posibilita la creación de una gama más amplia de futuros deseados. No obstante, pueden darse casos donde los participantes involucrados estén fuertemente sesgados por sus dominios profesionales, reduciendo así su campo de pensamiento (Soria-Lara et al., 2021). Algunas investigaciones han tratado de dar solución a este problema involucrando y comprometiendo a población joven en el proceso de *visioning* (Tuominen et al., 2014). Este grupo social es considerado como los adultos del mañana, lo que puede implicar una mayor preocupación y un mayor compromiso por entender y organizar su propio futuro.

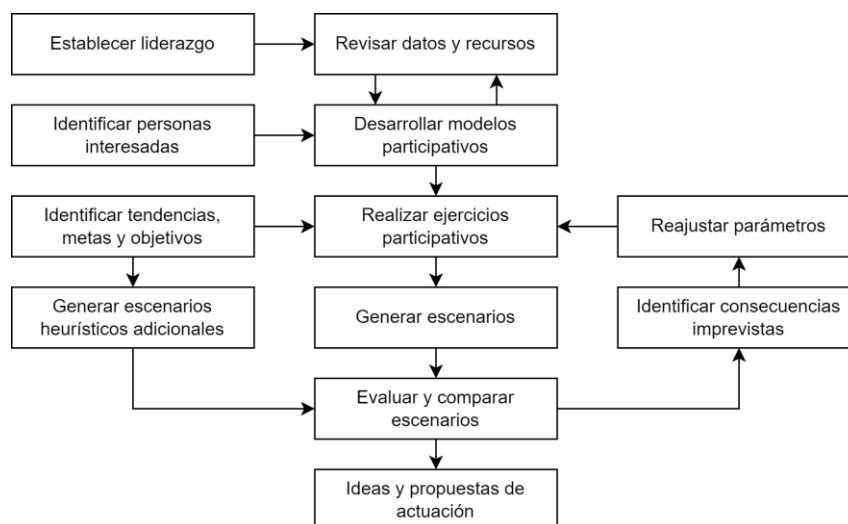


Figura 9. Proceso de una actividad de tipo *visioning* para la integración de actividades participativas en el proceso de planificación de escenarios (Reality Check). Extraído y adaptado de Chakraborty (2011).

Estas actividades participativas son normalmente desarrolladas bajo el marco de un taller. Este tipo de instrumentos colaborativos se basan en la creación de grupos de discusión, facilitando el diálogo simultáneo entre los participantes e incentivando la comunicación cara a cara. Además, permiten integrar otras actividades dinámicas que favorezcan la interacción entre participantes y el intercambio de ideas, lo que resulta en un proceso imaginativo más amplio y adecuado para cubrir todos los aspectos posibles que podría concebir un escenario futuro.

Por tanto, se entiende que la identificación de estos futuros depende de la inclusión de la variedad de participantes y de las diversas opiniones sobre los posibles resultados (Chakraborty, 2011). Sin embargo, este hecho no es el único que hace que los diálogos entre participantes sean más eficaces y, por tanto, resulten en un diseño más valioso de imágenes futuras. Junghans et al. (2018) identifican cuatro dimensiones fundamentales que, a su criterio, dan forma al diálogo de las partes interesadas:

- **Nivel de interacción entre participantes.** Intercambiar diferentes puntos de vista y perspectivas entre las partes interesadas permite generar nuevas ideas para una mayor aceptación política. Es vista como una de las condiciones clave para que se desarrollen con éxito los talleres participativos.
- **La diversidad de participantes.** Esta dimensión abarca diferentes facetas que caracteriza a los participantes. La diversidad puede entenderse a través del género, la edad, la etnia, el lugar de residencia habitual, el campo de estudio o trabajo al que pertenecen, sus habilidades, etc. La composición de los participantes debe reflejar el objetivo del taller (Junghans et al., 2018). De esta manera, cuanto más diversas sean las opiniones de las partes interesadas, más divergentes y, por lo tanto, más ricas e innovadoras serán las discusiones (Brodbeck et al., 2002). Así lo defiende Tuominen et al. (2014), al sostener que tener en cuenta más encuadres de problemas permite capturar una gama más amplia de puntos de vista.
- **Capacidad.** Hace referencia al nivel de comprensión, familiaridad y conocimiento de los participantes sobre el tema tratado, y sus capacidades para co-crear opciones adecuadas y factibles.
- **Competencias políticas.** La asistencia de agentes gubernamentales locales es vital si se prevé una actualización de las políticas existentes conforme a los resultados derivados de los talleres participativos.

Esta importancia que se le presta a cómo deben diseñarse las actividades participativas integradas en el diseño y creación de escenarios futuros resalta la relevancia, no solo de los propios resultados, sino también de todo el proceso participativo (Chakraborty, 2011). Además, su correcta implementación permite generar escenarios imaginativos y diversos, cubriendo incluso estados futuros derivados de acontecimientos poco probables, pero posibles.

Otro aspecto clave en el campo de la planificación espacial consiste en la representación espacial de escenarios a través de mapas. En este contexto, son numerosas las investigaciones que emplean escenarios narrativos como base para estudiar cambios territoriales (Duguma et al., 2022; Houet et al., 2016; Kok & van Delden, 2013). Los escenarios narrativos son descripciones cualitativas de futuros plausibles asociados a una combinación de cambios y características territoriales, socioeconómicas y ambientales (Mallampalli et al., 2016). Estos ofrecen una descripción detallada de cómo puede llegar a ser la configuración de un sistema bajo distintas líneas futuras. No obstante, para cuantificar las consecuencias de desarrollos alternativos es necesario transformarlos en mapas que representen el estado final del sistema si las tendencias descritas por los escenarios así sucedieran (Swetnam et al., 2011). Concretamente, el cartografiado de escenarios se encuentra fuertemente integrado en la fase de representación de resultados del proceso de modelización espacial. Para los modelos que reproducen escenarios de crecimiento urbano y cambios de usos del suelo, es una tarea fundamental la visualización de resultados. No solo ofrece una primera y rápida impresión de la configuración espacial del fenómeno modelado, sino que abre la puerta a un amplio abanico de análisis que no serían posibles de aplicar sin su representación a través de mapas. Pueden ser técnicas de comparación de mapas para realizar una evaluación de la cantidad y asignación de usos del suelo (Camacho Olmedo et al., 2015) o para seleccionar la escala más adecuada en la identificación de patrones espaciales (Pontius et al., 2011). Aunque también pueden aplicarse otras técnicas de tipo estadístico para la identificación

de factores explicativos del crecimiento urbano en los diferentes escenarios. Cabría destacar también la aplicación de indicadores, tales como métricas espaciales, para caracterizar los escenarios en lo que respecta a la configuración y composición espacial de los usos del suelo (Ritsema van Eck & Koomen, 2008).

El valor añadido que aporta esta tarea ha provocado que la modelización espacial y, más concretamente los modelos de simulación urbana, hayan aprovechado esta ventaja para visualizar el elevado número de resultados que pueden generar. De esta forma resulta más sencillo identificar las posibles direcciones que puede tomar la evolución de las áreas urbanas. Sin embargo, los beneficios de la representación cartográfica de escenarios no se limitan a la representación de resultados que ofrecen los modelos de simulación y los análisis derivados. Durante el proceso de participación pública en la planificación de escenarios, las actividades colaborativas suelen hacer uso de mapas como base para la interacción entre los participantes. Estas actividades ofrecen un entorno dinámico donde las partes interesadas pueden debatir y compartir ideas, facilitar el entendimiento de los elementos y procesos territoriales de un simple vistazo y crear un enlace de comunicación entre la ciudadanía, los investigadores y los expertos encargados de la toma de decisiones (Arranz-López et al., 2017). En definitiva, los mapas representan un lenguaje universal que no requiere un conocimiento profundo para su entendimiento. Es así como, en aquellas fases orientadas a la imaginación de futuros disruptivos donde la población local ha de hacer un esfuerzo de pensamiento futuro y de comprensión espacial, los mapas son un gran soporte para ayudar al diseño de estos escenarios.

3.3. MODELIZACIÓN ESPACIAL DE SISTEMAS URBANOS COMPLEJOS

Tradicionalmente, el análisis del sistema de ciudades que conforman dichas redes urbanas se ha abordado desde la Teoría general de sistemas (Von Bertalanffy et al., 1968), desde la geografía humana, la cual identifica las ciudades como lugares centrales según *Christaller y Losch*, y desde la ecología urbana, entendiendo esta última como la distribución de los grupos sociales en el territorio. Bajo este pretexto, se observa como diariamente las ciudades generan flujos de personas, materiales, energía e información, tanto entre ellas como con el entorno natural (Salvati & Carlucci, 2020). Del mismo modo, a medida que evolucionan en el tiempo, el tamaño de estos flujos crece, así como la diversidad de interrelaciones entre ellos. En este sentido, los procesos que impulsan el desarrollo urbano, basados en la interacción de factores de tipo económico, político, social y natural, dan lugar a un aumento de la complejidad de estos organismos. Así, las ciudades, a medida que evolucionan, se vuelven más complejas (Batty, 2020a; Salvati & Carlucci, 2020). Un sistema complejo es, por tanto, una entidad coherente cuyos elementos, interacciones y dinámicas generan estructuras que no se pueden comprender en su totalidad desde una primera aproximación (Batty & Torrens, 2005).

Esta idea deriva en la siguiente pregunta ¿qué enfoques son los más adecuados para mejorar la comprensión de los sistemas urbanos complejos? Para describir tanto cualitativa como cuantitativamente sus características, estos deben abordarse a través de métodos capaces de reproducir su complejidad. Partiendo de este enfoque, y dada la histórica necesidad de hacer frente a los múltiples retos que plantea el proceso de urbanización en términos de transición ecológica y territorial, Pumain & Reuillon (2017) señalan la importancia de utilizar de los modelos para explorar las posibles direcciones de los cambios producidos en los sistemas urbanos.

Modelar permite explicar el propio sistema, acercarse a las dinámicas principales, limitar los resultados a rangos manejables, sugerir mejoras para el sistema, e incluso ayudar a esclarecer las incertidumbres fundamentales (Epstein, 2008). Según Pumain & Reuillon (2017), desarrollar modelos urbanos es una tarea esencial para:

- Intentar comprender, explicar y predecir cambios futuros, identificar retos y pensar en la resolución de problemas a gran escala.
- Comprender las interacciones y la coevolución de unas ciudades con otras y conocer las consecuencias de estos procesos de interacción en las estructuras y dinámicas que comparten los sistemas urbanos.
- Explorar diferentes escenarios plausibles de evolución urbana.
- Aportar ideas y supervisar estos sistemas respecto a la mejora de la resiliencia y la sostenibilidad, construyendo escenarios de cooperación y la emulación creativa.

La mayoría de los modelos urbanos actuales se basan en reproducir la evolución urbana a través de las relaciones entre localización y densidad, pero la aplicación de reglas basadas en la geometría fractal ha dado lugar a nuevos modelos en los que los procesos de crecimiento están ligados a la geometría de los sistemas urbanos (Berling-Wolff & Wu, 2004). Tal y como describen Batty & Longley (1986) las ciudades son claros ejemplos de geometrías fractales. De esto modo, se entiende que los modelos que trabajan con estructuras fractales pueden calibrarse para simular situaciones reales mediante el empleo de reglas sencillas. No obstante, su uso más eficaz consiste en deshacer analíticamente las reglas que se han utilizado en el pasado para así poder diseñar ciudades idealizadas (Batty, 2008) o plantear diferentes situaciones futuras.

En los siguientes apartados se hace una síntesis del origen y evolución de los sistemas urbanos, haciendo hincapié en los modelos de simulación del crecimiento urbano. Por último, se explican en detalles los modelos basados en AC, destacando la flexibilización que estos han experimentado para adaptarse a las necesidades de la planificación actual.

3.3.1. ORIGEN Y EVOLUCIÓN DE LA MODELIZACIÓN ESPACIAL

El funcionamiento de las ciudades en el espacio y en el tiempo viene determinado por la elección espacial donde la población, de manera individual o grupal, se ubica respecto a otros individuos y a sus actividades en forma de distintos tipos de usos del suelo (Batty, 2012). La relación entre estas actividades está dominada por la concentración o dispersión espacial de las entidades organizativas y las relaciones de competitividad que existente entre ellas, es decir, lo que se conoce como economías y deseconomías de aglomeración (Richardson, 1995). Estos patrones de localización pueden representarse en términos de accesibilidad, dando lugar a diferentes niveles de agrupación jerarquizados. De esta idea han surgido diferentes teorías sustentadas en la distribución espacial de las actividades humanas y el fenómeno urbano.

No obstante, los fundamentos que sostienen estas afirmaciones tienen su origen en modelos desarrollados en el siglo XIX, y que constituyen algunos de los pilares básicos de la Teoría de la localización. En este ámbito, el modelo de *Johann Heinrich von Thünen* desarrollado en 1820 marcó un precedente histórico. Contribuyó, mediante el concepto de renta de localización y su relación con los costes de transporte (figura 10), a identificar los principios espaciales de utilización del suelo (Walker, 2022). A principios del siglo XX, *Alfred Weber* planteó la Teoría de la localización industrial (Weber, 1929). Esta teoría tradicional estaba basada en la búsqueda de la localización óptima del tejido industrial dentro de un marco dominado por el coste del transporte. Poco tiempo después tuvo lugar una de las teorías geográficas deductivas más destacadas de la época, la Teoría de los lugares centrales (Christaller, 1933). En ella se establecía una jerarquía para organizar los principales parámetros que condicionan la organización territorial, siendo estos el número de centros urbanos, su área de influencia, la población y la cantidad de bienes y servicios ofrecidos.

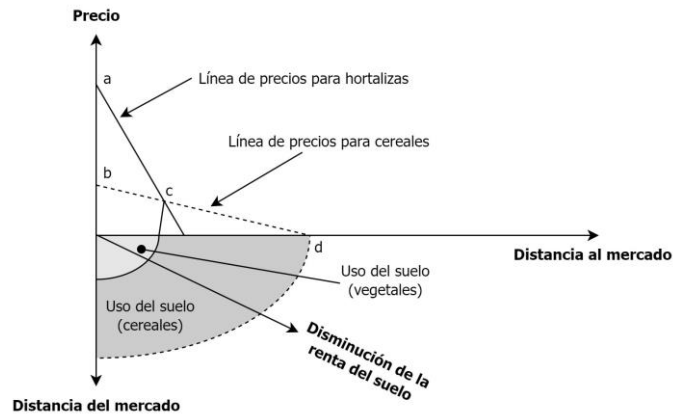


Figura 10. El modelo de *Von Thünen* de precio, uso y renta de la tierra (Nelson, 2002).

La lógica del patrón de lugares centrales anidados formaba una textura hexagonal. Cada lugar central está representado por el centro de un hexágono, el cual atiende a 6 localizaciones (vértices del hexágono) (figura 11). Esta idea geométrica que representa la influencia y las relaciones entre las distintas localizaciones según la jerarquía del sistema de ciudades permitía a integrar los supuestos de *Christaller* basados en los principios organizativos de mercado, transporte y administrativo: minimizar los costes de transporte, mantener una oferta de servicios equilibrada y establecer una competencia entre los productores.

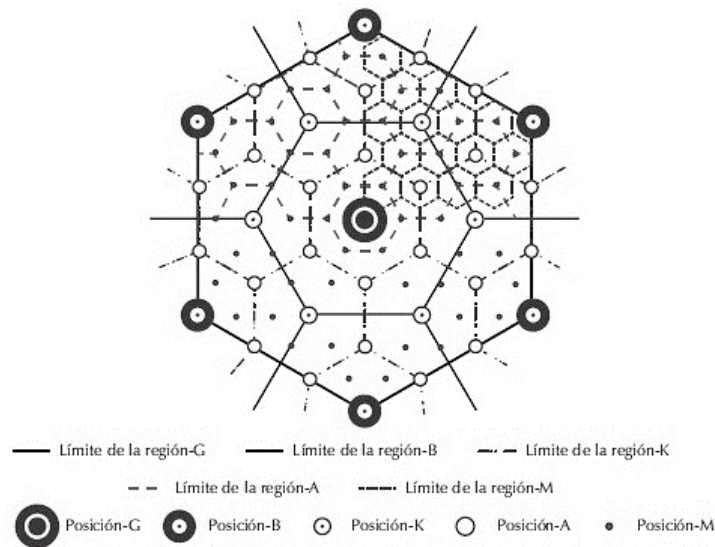


Figura 11. Entorno hexagonal de *Christaller* según los principios organizativos (Kitchin & Thrift, 2009).

Estos modelos de localización espacial de carácter regional allanaron el paso a la modelización urbana. El origen de su aproximación se remonta a la década de 1950, en los primeros estudios de transporte donde se pretendía resolver la congestión de las áreas urbanas. Para responder a esta necesidad, se utilizaron técnicas de análisis de regresión lineal y de distribución espacial para modelizar la generación de los desplazamientos (Batty, 1976). Este se basaba en el modelo de gravedad, a partir del cual parten la mayoría de los modelos de distribución espacial. Eran técnicas manejables y bastante sencillas de utilizar, por lo que se extendieron rápidamente. En este contexto cabe mencionar el modelo de difusión planteado por *Torsten Hägerstrand*. La

conclusión a la que llegó Hagerstrand (1968) a través de su modelo, según detalla Tulla (1983) es la siguiente: «*Toda difusión empieza en un punto donde, al principio, el número de nuevos adeptos disminuye con la distancia a dicho punto. La fricción de la distancia es menor a medida que deja de ser relevante, ya que cuando se ha desarrollado el proceso la innovación ha sido aceptada mayoritariamente por la población del área estudiada*».

A principios de esta misma década, se había desarrollado un nuevo modelo orientado a simular patrones de localización de actividades residenciales y de servicios en la ciudad de Pittsburgh. Esta herramienta de modelización urbana, conocida como modelo de *Lowry* (Lowry, 1964), consta de dos componentes principales: un modelo de gravedad y un mecanismo de base económica. Su distribución espacial se lograba teniendo en cuenta los desplazamientos de la población (casa – trabajo, casa – mercado) (Jun & Moore, 2002). Fue uno de los modelos de distribución espacial de los usos del suelo más relevantes en el contexto de la planificación (Aguilera Benavente et al., 2010).

En esta misma línea, el modelo desarrollado en 1970 por *Waldo Rudolph Tobler*, el cual describía el crecimiento poblacional haciendo énfasis en su distribución geográfica (Tobler, 1970) fue otro avance relevante en el campo de la simulación del crecimiento urbano. Dicho modelo parte de las bases del principio de parsimonia y de la premisa conocida como primera ley de la geografía, también denominada principio de autocorrelación espacial: «*Todo está relacionado con todo, pero los elementos más próximos entre si espacialmente, presentan una relación mayor que los elementos más distantes*».

Sin embargo, a mediados de los años setenta, el campo de la modelización urbana empezó a caer en el descrédito debido a los pobres resultados obtenidos de los modelos globales a gran escala. Por esta razón, los planificadores regionales comenzaron a desarrollar modelos a menor escala centrados en una o varias cuestiones concretas (Berling-Wolff & Wu, 2004). Derivado de este contexto histórico y del auge de estudios urbanos sobre la estructura y organización espacial del territorio mediante el uso de geometrías, surgen nuevos enfoques orientados a identificar los patrones espaciales que presentan las ciudades y como estos ayudan a comprender su evolución futura en un contexto de incertidumbre. En la década de 1980, Batty & Longley (1986) describen la estructura urbana a través de fractales, un concepto desarrollado por *Benoit Mandelbrot* en 1975 para representar el entorno mediante objetos geométricos que se distribuyen repetidamente en el espacio y que no varían si se produce un cambio de escala. Mediante las características de autosimilitud e irregularidad que presentan las geometrías fractales se pretendía generar un realismo perceptible en el que se pudieran enmarcar los modelos de crecimiento urbanos tradicionales (Batty & Longley, 1986). Este mismo concepto fue utilizado como herramienta para el análisis espacial de las aglomeraciones urbanas (Frankhauser, 1998).

Fue precisamente la geometría fractal, característica intrínseca que posee la forma urbana, la que motivó el auge de los modelos basados en AC a partir de los años 90. Aunque estos fueron desarrollados a mediados del siglo XX por *Stanislaw Ulam*, quien estableció las bases teóricas de estos modelos, no adquirieron suficiente entidad años después gracias a la obra de von Neumann (1966) titulada *Theory of Self-reproducing Automata*. Los avances informáticos en los sistemas de computación provocaron un fuerte impulso a estos modelos, momento que aprovechó *Stephem Wolfram* para exponer su obra *Cellular automata as models of complexity* (Wolfram, 1984). En ella habla de cómo un modelo, diseñado a partir de un conjunto de reglas simples, podía generar patrones fractales complejos para representar sistemas naturales. En 1970, *Martin Gardner* presentó las reglas de un nuevo juego ideado por *John Horton Conway*, denominado el Juego de la Vida (*Game of Life*) (figura 12), el cual es actualmente el AC más popular (Adamatzky, 2010). En un contexto geográfico, los AC fueron utilizados por White & Engelen (1993) para desarrollar un modelo de la dinámica del uso del suelo urbano con una alta resolución espacial. Fue a partir de este momento cuando esta técnica adquirió gran relevancia en la modelización de la dinámica

urbana, especialmente debido a dos características que hacen que los AC sean intrínsecamente atractivos para su aplicación a problemas geográficos (White & Engelen, 1993). En primer lugar, son espaciales y, en segundo lugar, pueden generar formas muy complejas mediante reglas sencillas, facilitando la comprensión de la complejidad espacial.

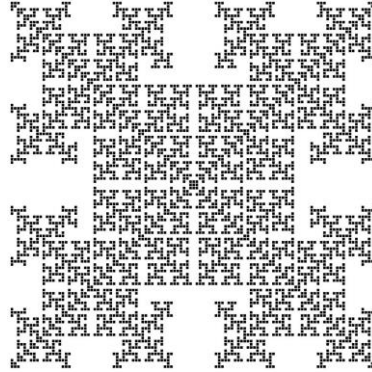
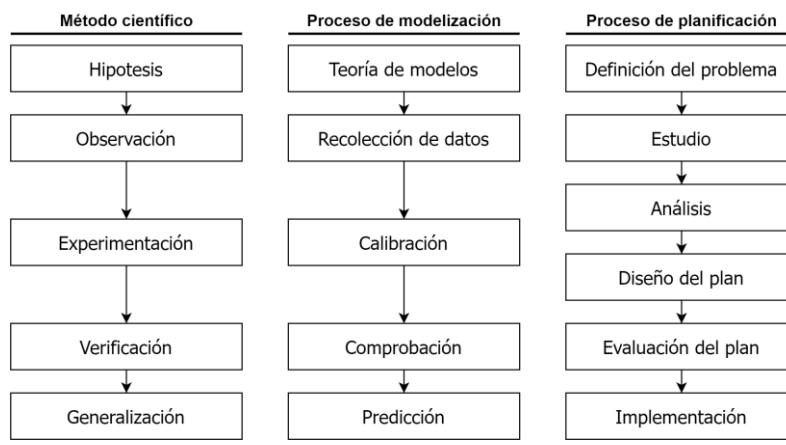


Figura 12. Ejemplo de un patrón espacial del *Juego de la Vida* formado tras 57 iteraciones a partir de una única celda viva. Extraído de Adamatzky (2010).

Todos estos modelos urbanos desarrollados a lo largo de la historia se han diseñado según un proceso formal caracterizado por diversas etapas, entre las que destacan la formulación de hipótesis, observación, recogida de datos, calibración, ensayo, verificación, evaluación e implementación. Pero este debe considerarse dentro de un contexto más amplio. Como se observa en la figura 13, a lo largo de todo este proceso de modelización urbana se encuentran implícita y explícitamente elementos correspondientes al método científico y a la planificación vinculados por un hilo conductor (Batty, 1976). De este modo, el diseño de modelos urbanos, como los descritos anteriormente, se nutren de la planificación y de la ciencia para validar la hipótesis formulada. Citando a Chadwick (1978): «*Se trata de encontrar la verdad a través de la ciencia, buscar una solución a los problemas que plantea el proceso de urbanización desde un sentido empírico, y la planificación de sistemas teleológicos adaptativos para el diseño de instrumentos adecuados a dicho proceso*».



Las numerosas retroalimentaciones que pueden producirse durante estos procesos son demasiado complejas para describirlas, por lo que se han excluido.

Figura 13. Método científico, proceso de modelización y proceso de planificación. Extraído y adaptado de Batty (1976).

Estas ideas ponen de manifiesto que el análisis, el diseño y la evaluación de cualquier sistema urbano o regional pueden verse facilitados y ampliados por la modelización (Batty, 1976). Inclusive, los modelos también ayudan a reproducir escenarios de mitigación de impactos producidos por grandes cantidades de emisiones depositadas en la atmósfera y el suelo, y por los residuos que se producen en las aglomeraciones urbanas (Triantakonstantis & Mountrakis, 2012).

3.3.2. LOS MODELOS DE SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO URBANO

En un sentido estricto, simular consiste en el diseño y aplicación de un modelo para llevar a cabo experimentos que analicen los aspectos más destacados de un sistema, tratando de comprender así su comportamiento (dentro de los límites impuestos por un conjunto de criterios) (Pritsker, 1979). Por su parte, la geosimulación es un término genérico que se ocupa del diseño y la construcción de modelos espaciales para analizar y tratar de comprender el funcionamiento de los sistemas espaciales, según describen Benenson & Torrens (2004). Ambos autores resaltan la capacidad de los modelos para ayudar a explorar ideas e hipótesis sobre el funcionamiento de los sistemas espaciales, desarrollar software y herramientas de modelización espacial para apoyar la simulación espacial, y resolver problemas reales en contextos geográficos.

El tema central de esta tesis se enmarca en el campo de la geosimulación. Concretamente, en la simulación prospectiva del crecimiento urbano. Su objetivo consiste en generar imágenes futuras a través del uso de escenarios exploratorios y/o normativos, de tal manera que los resultados obtenidos constituyan una herramienta eficaz en la planificación de estos espacios (Aguilera Benavente et al., 2010).

En este contexto, la simulación urbana ha experimentado un importante auge debido a la facilidad para generar una representación razonable de la propia forma urbana (White & Engelen, 1993). Su base parte de la propia geometría urbana, la relación de tamaño entre ciudades, las funciones económicas o los patrones sociales con respecto a la estructura de las ciudades (Yang & Lo, 2003). Estas bases son comunes a un objetivo principal basado en la abstracción de la realidad urbana para contrastar teorías de localización y generar representaciones futuras de posibles patrones espaciales (Batty, 2009). No obstante, aunque este objetivo sigue siendo el mismo con respecto a su origen, el enfoque de aplicación de estos modelos con respecto a la planificación urbana ha ido variando a lo largo del tiempo (Aguilera Benavente et al., 2010). Un elevado número de modelos urbanos han sido diseñados para realizar previsiones cualitativas, mientras que otros tratan de explicar la expansión urbana y la evolución de los patrones que esta genera (Couclelis, 1997).

A pesar de la gran variedad de enfoques de modelización que se pueden encontrar en la literatura, es posible identificar una estructura común válida para los modelos de simulación del cambio de usos del suelo espacialmente explícitos (figura 14) (Verburg et al., 2006). Esta estructura parte de dos componentes esenciales en base a los cuales se desarrollan este tipo de modelos: cantidad y localización (Camacho Olmedo et al., 2015). En primer lugar, se llevan a cabo las acciones necesarias para establecer la magnitud del cambio de los diferentes usos del suelo. Y, en segundo lugar, se aplican una serie de instrumentos que facilitan la asignación, es decir, la elección por parte del algoritmo de la ubicación idónea. Este segundo paso, basado en la selección de los factores que determinan el cambio y su traducción a un mapa de aptitud o mapa de potencial de transición (Guan et al., 2011), es uno de los principales componentes de un modelo de simulación del crecimiento urbano y de los cambios en los usos del suelo (Verburg et al., 2006).

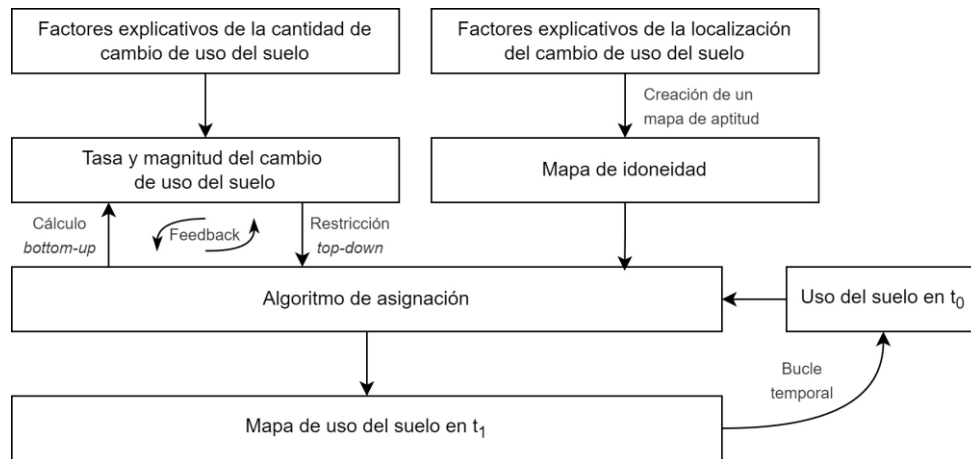


Figura 14. Estructura general de los modelos de cambio de uso del suelo espacialmente explícitos (Verburg et al., 2006).

A continuación, se habla en detalle de los métodos estadísticos encargados de generar los mapas de aptitud y de los instrumentos de geosimulación basados en algoritmos de asignación capaces de modelar y reproducir patrones espaciales de crecimiento urbano y cambios en los usos del suelo.

3.3.2.1. Métodos estadísticos para la selección de factores explicativos

Comprender en profundidad los factores que interviene en la evolución de los sistemas urbanos es un aspecto necesario para lograr una planificación eficaz de estos sistemas, especialmente si se pretende estudiar el comportamiento del crecimiento urbano y de los cambios en los usos del suelo, así como de sus efectos (Leao et al., 2004). Los estudios de caso en este ámbito de estudio ayudan a analizar de manera adecuada los patrones desarrollados en una determinada región (Verburg et al., 2004). De este modo, se afirma que conocer las causas del proceso de urbanización es una tarea fundamental para el adecuado desarrollo de los modelos que simulan este fenómeno (Gómez Delgado & Rodríguez Espinosa, 2012). Aunque dicha tarea resulta compleja debido al elevado número de factores que intervienen, los SIG han logrado alcanzar dicho objetivo de manera eficiente facilitando la aplicación de técnicas estadísticas a un contexto espacial.

Como se ha señalado anteriormente, el análisis de los factores explicativos que intervienen en el cambio de los usos del suelo es una de las tareas preliminares en el proceso de modelización. A menudo, un mismo factor puede influir tanto en la magnitud como en la asignación del cambio. Y, aunque determinar magnitud o cantidad de cambio de los diferentes usos del suelo prevista para un determinado escenario futuro es una tarea clave en la modelización, numerosos estudios han optado por asumir las cifras que han marcado periodos pasados (Aburas et al., 2016). En esta línea, la mayoría de los esfuerzos se han destinado al diseño e implementación de nuevos métodos para explicar los factores que determinan la ubicación espacial de los cambios en los usos del suelo y, en el marco del crecimiento urbano, aquellos que determinan la distribución espacial de las distintas funciones de la ciudad (uso residencial, uso industrial, uso comercial, etc.).

Es indiscutible la razón por la cual los modelos de simulación urbana deben ser alimentados por los factores que explican el fenómeno en cuestión. La idoneidad de un espacio concreto del territorio para desarrollar un uso del suelo está relacionada con factores de localización y propiedades del lugar (Barreira-González et al., 2019). Este hecho puede entenderse mediante una función determinista que integra diversos factores, los cuales contribuyen a la evaluación de cada porción del territorio (Barredo et al., 2004). Gómez Delgado & Rodríguez Espinosa (2012) analizan diversas técnicas estadísticas enfocadas a analizar los factores que explican los cambios

en los usos del suelo, algunas de ellas exploradas por Plata Rocha et al. (2011), tales como Regresión Lineal Múltiple (RLM), Regresión de Mínimos Cuadrados Parciales (RMCP), Regresión Logística Espacial (RLE), Regresión Geográficamente Ponderada (RGP) y Regresión Multinivel (RM). La continua discusión por cuales son las más adecuadas sigue abierta a debate. No obstante, algunas de ellas presentan unas características que las hacen más idóneas para determinados casos.

En un contexto más reciente, los modelos de Redes Neuronales Artificiales (RNA) están adquiriendo peso en el ámbito de la simulación de la modelización urbana. Estos consisten en una familia de métodos de aprendizaje automático que se emplean para aproximar las relaciones complejas no lineales entre los patrones de uso del suelo y sus variables determinantes. Actualmente se han aplicado con éxito al análisis y modelado de los cambios en el uso y la cobertura del suelo (Liang et al., 2018; Shafizadeh-Moghadam et al., 2017; T. Xu et al., 2019; Zhai et al., 2020).

Otro método relativamente reciente que ha sido implementado en este campo son los algoritmos de *Random Forest* (RF), una agregación de los algoritmos de árboles de decisión. RF se emplea habitualmente para resolver problemas de clasificación y regresión. Tienen una buena interpretabilidad y una complejidad temporal moderada, pudiendo reflejar la contribución de cada variable espacial a la predicción (Zhou et al., 2020). Además, han demostrado ser métodos eficaces para extraer las reglas de transición de los modelos de simulación de cambios en el uso del suelo (Liang et al., 2021).

Por su parte, los modelos RLE continúan utilizándose para explorar el comportamiento de las variables espaciales, ya sea en datos en formato ráster o vectorial. La sencillez y efectividad de estos modelos ha impulsado su aplicación en estudios como la modelización espaciotemporal de las predicciones de crecimiento urbano basadas en factores determinantes de varias ciudades de Arabia Saudí (Alqurashi et al., 2016), el cálculo de los valores de aptitud de un modelo de simulación del crecimiento urbano basado en AC (Barreira-González et al., 2019) o la identificación de factores espaciales explicativos del crecimiento urbano en áreas metropolitanas de Chile (Plata Rocha & Rojas Quezada, 2010).

A pesar de los avances en este campo, muchas de las técnicas estadísticas mencionadas están diseñadas para tratar con datos no espaciales, por lo que no aprovechan todo el potencial que ofrecen los datos espaciales. Tal y como señala Fotheringham et al. (2002), los datos espaciales contienen información sobre atributos y localización, mientras que los datos no espaciales sólo contienen información sobre atributos. Los métodos RGP permiten identificar la naturaleza de las relaciones espaciales existentes entre las variables. Además, estas relaciones pueden variar en el espacio, lo que se identifica como no estacionariedad espacial (Brunsdon et al., 1996).

Dado que en el caso del desarrollo de los distintos usos del suelo urbano existen dos estados de la variable dependiente (crecimiento o no del uso en cuestión), los modelos deben ajustarse para predecir una variable binaria. Los modelos RGP que emplean este tipo de variables dependientes se denominan Regresión Logística Geográficamente Ponderada (RLGP). Este es capaz de explicar los vínculos entre los factores explicativos y el proceso de expansión urbana, mejorando así los planes de desarrollo urbano de manera considerable (Mondal et al., 2015). Además, su empleo en la definición de las reglas de transición de los modelos basados en AC mejora el rendimiento de las simulaciones. Incluso, si los procesos locales a la misma escala son temporalmente estables, el propio modelo RLGP será válido y útil para la simulación del futuro (Mirbagheri & Alimohammadi, 2017).

Dadas las ventajas que presentan los modelos RLGP en el análisis de datos espaciales, han sido muchos los estudios que han empleado este instrumento en sus investigaciones. En un contexto urbano, destacan algunas de ellas orientadas al análisis multiescalar de las relaciones espacialmente variables entre los modelos de paisaje agrícola y la urbanización (Su et al., 2012), a la medición del papel de los factores intraurbanos para modelar el crecimiento urbano (Diksha et al., 2023) y a la modelización de la variación espacial de los factores explicativos de la expansión urbana de Calcuta (Mondal et al., 2015). También se han empleado para modelar la estructura espacial de islas de calor urbanas (Szymanowski & Kryza, 2011) y para detectar relaciones espacialmente no estacionarias y dependientes de la escala entre la fragmentación del paisaje urbano y los factores conexos (Gao & Li, 2011).

Como se ha podido observar, son numerosos los estudios enfocados a entender relaciones entre variables que describen el comportamiento de diversos aspectos del paisaje urbano (Gao & Li, 2011; Mondal et al., 2015; Su et al., 2012; Szymanowski & Kryza, 2011), destacando importantes trabajos que emplean RLGP. Este interés se debe a que el propio hecho de conocer y comprender los factores que explican un fenómeno es sinónimo de predecir. No obstante, estos estudios tratan de identificar los factores explicativos del crecimiento de la superficie urbana, sin profundizar en los factores específicos que afectan a cada uno de los usos del suelo urbano. Este hecho señala la necesidad de profundizar en este aspecto a través de la aplicación de RLGP sobre datos urbanos a escala de detalle, cuestión que se tratará en profundidad durante el desarrollo de esta investigación.

3.3.2.2. Instrumentos de simulación espacial del crecimiento urbano

Los modelos de simulación urbana se han desarrollado para estudiar la expansión urbana y su impacto en el medio ambiente. Principalmente se han empleado para formular políticas urbanas y analizar escenarios de desarrollo (Li & Gong, 2016). Desde un punto de vista técnico, un modelo de crecimiento urbano es un tipo particular de modelo numérico en el que intervienen diversos factores como la economía, la geografía, la sociología y la estadística para explorar los mecanismos de la evolución y retroalimentación del sistema urbano (Musa et al., 2017). En definitiva, estos modelos se encargan de captar relaciones intrínsecas y complejas del crecimiento urbano en el espacio y en el tiempo (Triantakoustantis & Mountrakis, 2012). Dentro del ámbito de la simulación del crecimiento urbano pueden encontrarse instrumentos de diversas tipologías. Estos instrumentos, centrados principalmente en el proceso de modelización, pueden clasificarse según sus características. La principal distinción hace referencia a los modelos espaciales y no espaciales. Estos últimos ofrecen una estimación sobre la evolución futura en términos de tasas o cantidades de cambio sin tener en cuenta la componente espacial (Gallardo, 2018), como pueden ser los modelos basados en Dinámicas de Sistemas (Aguilera Benavente et al., 2009). No obstante, los modelos más comúnmente empleados en la simulación del crecimiento urbano son los espaciales, de los que se ha hablado anteriormente. Sin embargo, no solo es posible distinguir los modelos según sean espaciales o no, también cabría añadir otras distinciones. De entre la gran diversidad de enfoques de modelización que se han desarrollado, es posible hacer las siguientes distinciones (Gallardo, 2018; Verburg et al., 2006):

- Modelos deductivos frente a modelos inductivos.
- Modelos dinámicos frente a modelos estáticos.
- Modelos cuantitativos frente a modelos cualitativos.
- Modelos descriptivos frente a modelos prescriptivos
- Modelos globales frente a modelos regionales.

De entre los mencionados, no existe un enfoque único que sea el más adecuado para simular cambios en los usos del suelo. La elección del modelo depende de los datos disponibles que se van a emplear y de las preguntas de investigación a las que haya que dar respuesta (Verburg et

al., 2006). En este contexto, es importante tener en cuenta que ningún modelo es capaz de responder a todas las preguntas. Por ejemplo, para explorar la dinámica del crecimiento urbano un modelo basado en AC (un tipo de modelo espacialmente explícito y dinámico) puede ser muy adecuado, aunque sea incapaz de explorar en su totalidad otras transiciones que se produzcan hacia usos o coberturas no urbanas, como puede ser el uso agrícola o la cobertura forestal con la misma adecuación (Verburg et al., 2006).

En términos generales, los modelos de crecimiento urbano han sufrido una importante evolución desde su aparición. Li & Gong (2016) identifican dos vías, las cuales se corresponden con las dimensión espacial y temporal de los modelos (figura 15). Esta primera se centra en la escala, que tiene en cuenta las interacciones locales, y la segunda expresa el grado de dinamismo, que hace referencia a las etapas temporales de la modelización.

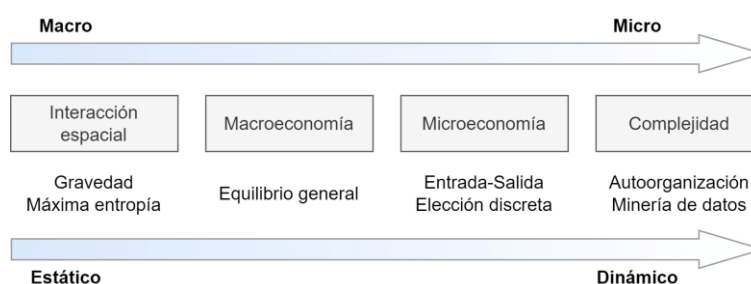


Figura 15. Evolución de los modelos de crecimiento urbano. Extraído de Li & Gong (2016).

Como punto de partida fundamental en los modelos de simulación crecimiento y cambios en los usos del suelo se lleva a cabo un previo análisis mediante la creación de una matriz de tabulación cruzada o matriz de transición. A través del cruce de dos mapas de usos del suelo de momentos temporales distintos se obtiene un registro cuantitativo de los cambios producidos en el periodo seleccionado (Gallardo, 2018). Examinar dicha matriz también permite evaluar el cambio total de las categorías según dos pares de componentes: cambio neto e intercambio, así como ganancias y pérdidas brutas. El análisis de estos componentes hace posible la distinción entre transiciones claramente sistemáticas y transiciones aparentemente aleatorias (Pontius Jr. et al., 2004). Este es un punto común en la mayoría de los instrumentos de simulación empleados para explorar los cambios de usos del suelo y el crecimiento urbano.

Respecto a los tipos de modelos de simulación urbana, Li & Gong (2016) hace una distinción según tres clases de modelos de crecimiento urbano: uso del suelo/transporte, AC y Modelos Basados en Agentes (MBA). Desde otro punto de vista, Aguilera Benavente et al. (2010) destacan los principales instrumentos empleados en la simulación del crecimiento urbano a través de la generación de simulaciones prospectivas y de escenarios futuros. Concretamente, resalta la fuerte expansión de los AC en la generación de escenarios exploratorios, así como la de los MBA. En cuanto a la generación de escenarios normativos, los modelos basados en Evaluación Multicriterio (EMC) son más idóneos.

En esta misma línea, Triantakostas & Mountrakis (2012) y Musa et al. (2017) hacen un detallado ejercicio de revisión donde señalan los principales modelos geoespaciales de crecimiento urbano y las iniciativas de modelización más utilizadas. No obstante, dado que el objetivo de esta sección no consiste en detallar todos instrumentos de simulación espacial del crecimiento urbano existentes, se ha realizado una breve síntesis de los modelos más destacados en la literatura científica, mencionando algunas de las aplicaciones más denotadas en el ámbito urbano.

Fractales. La modelización fractal se ha utilizado en diversos campos científicos, aunque ha cobrado especial interés en la simulación de la estructura urbana (Batty & Longley, 1986; Triantakoustantis & Mountrakis, 2012), en el análisis espacial de las aglomeraciones urbanas (Frankhauser, 1998) y en la comparación de los patrones de la morfología urbana (Frankhauser, 2004). También se han desarrollado diversos algoritmos para modelizar el crecimiento urbano en combinación con la teoría del caos (Triantakoustantis, 2012) y para identificar los límites urbanos (Tannier et al., 2011).

Regresión Logística. Debido a su sencillez y a su fácil implementación, este método estadístico ha sido utilizado como instrumento exploratorio para la selección de factores y como modelo de simulación. Hu & Lo (2007) lo emplean para modelar el crecimiento urbano en Atlanta, mientras que Barreira-González et al. (2019) hace uso de la RL para generar mapas de probabilidad que representen la adecuación de los diferentes usos del suelo urbano y explorar que variables determinan la evolución de dicho fenómeno.

Evaluación Multicriterio. Este método ha sido aplicado en numerosas ocasiones para generar escenarios futuros de crecimiento urbano (Pettit & Pullar, 2004). También destacan otros trabajos relacionados orientados a la modelización de la idoneidad del hábitat basada en SIG (Store & Kangas, 2001), la simulación de escenarios de crecimiento urbano (Plata Rocha et al., 2011; Sadooghi et al., 2022) o la planificación urbana para comprender la expansión de las ciudades (Criado et al., 2017).

Modelos Basados en Agentes. Los modelos MBA han adquirido interés en el diseño de políticas territoriales combinando escenarios exploratorios y *backcasting* participativo (Van Berkel & Verburg, 2012). Se han aplicado con éxito en la modelización de diferentes procesos urbanos gracias a su capacidad para incluir agentes con un determinado comportamiento (Cantergiani & Gómez Delgado, 2016, 2020; Crooks, 2010; Kaviari et al., 2019; Shurupov et al., 2022). Además, se han combinado junto con cadenas de Markov para simular la expansión urbana (Arsanjani & Kainz, 2011) y con AC para predecir el crecimiento urbano y ofrecer una mejor gestión de los recursos y una toma de decisiones informada (Kumar et al., 2021; Mustafa et al., 2015).

Redes Neuronales Artificiales. Aunque esta técnica es más reciente, su repercusión en el ámbito de la modelización urbana ha sido significativa. Rifat & Liu (2022) la emplean para predecir escenarios futuros de crecimiento urbano y posibles inundaciones urbanas. Pijanowski et al. (2014) configuran un modelo de simulación de crecimiento urbano a escala nacional para su ejecución en un entorno informático de alto rendimiento (*High Performance Computing*, HPC) utilizando *big data*. Por otra parte, Chakraborti et al. (2018) simulan el alcance espacial de la expansión urbana y la demarcación de sus límites con el fin de lograr una planificación urbana y una gestión de los recursos del suelo eficientes.

Árboles de Decisión. A pesar de que su aplicación en la modelización del crecimiento urbano ha tenido menos repercusión frente a otros modelos, los árboles de decisión se consideran herramientas útiles debido a su sencillez para entender la estructura del modelo y a su capacidad para elaborar reglas de decisión (Musa et al., 2017). Este método ha sido aplicado al análisis y modelización de la estructura urbana y la dinámica del uso del suelo (Kim et al., 2006). También se ha utilizado en la clasificación basada en imágenes del uso del suelo urbano para cartografiar las estructuras urbanas y la cubierta vegetal, que son componentes importantes en el modelado y la planificación urbana (Triantakoustantis & Mountrakis, 2012).

Autómatas Celulares. La popularidad de estos modelos en la aplicación urbana se debe a su enfoque directo y su capacidad para realizar cálculos complejos utilizando información local (Athanasopoulos et al., 2012). Tal y como indica Torrens & O'Sullivan (2001), en los AC destaca la simplicidad de su formulación y la visualización dinámica que permiten como medio de

representación espacial. Además, son altamente compatibles con datos de teledetección y SIG (Hashim et al., 2011). Pero posiblemente destaquen por su flexibilidad, hecho que ha permitido adaptarlos para lograr modelar diferentes procesos dinámicos (Barreira González, 2017).

Este último enfoque es el que se utiliza durante el desarrollo de la presente investigación. Además de las características descritas, su elevada capacidad de análisis y evaluación de los usos del suelo en ámbitos urbanos a escala local y regional ha propiciado una clara orientación de los AC a la modelización urbana, observable en gran parte de la literatura científica en este ámbito (Triantakou & Mountrakis, 2012). La integración de este método con el enfoque de Markov lo hace aún más adecuado en el manejo de la dinámica de cambios de uso del suelo urbano desde una perspectiva espacial (Guan et al., 2011). Los AC se abordan a continuación con mayor detalle.

3.3.3. LOS AC EN LA SIMULACIÓN DE ESCENARIOS DE CRECIMIENTO URBANO

Los AC se basan en una cuadrícula bidimensional compuesta por celdas. Cada una de estas celdas representa una porción del espacio, identificadas como píxeles en imágenes ráster. Estas pueden encontrarse en diferentes estados, lo que representa a los diferentes usos del suelo, o la presencia/ausencia de un fenómeno (el crecimiento urbano en este caso). Su estado futuro se determina por un conjunto de reglas de transición, definidas por la influencia que ejercen las celdas contiguas sobre la celda analizada, lo que se denomina vecindad. De este modo, las celdas se actualizan simultáneamente en una secuencia de pasos temporales denominadas iteraciones. Como se puede observar, los AC están constituidos por cinco componentes principales en su forma más tradicional: a) las celdas, b) el entorno o conjunto de celdas, c) los ciclos o iteraciones temporales, d) la vecindad y e) las reglas de transición. Estas características hacen que los modelos basados en AC sean fácilmente aplicables para representar estructuras espaciales.

En el contexto de los sistemas urbanos, las reglas de transición que determinan el estado de una celda a otra pueden interpretarse como el desarrollo urbanístico de una determinada zona o, en caso contrario, del abandono o declive de ese mismo espacio (Batty, 1997). En definitiva, los modelos basados en AC se han desarrollado fundamentalmente para explorar la complejidad espacial, poner a prueba teorías e ideas sobre las ciudades de forma abstracta y servir como instrumentos de apoyo a la planificación urbana (Torrens & O'Sullivan, 2001). El desarrollo de la presente investigación hace hincapié en este último punto.

Por su parte, el desarrollo de los SIG en combinación con la creciente disponibilidad de imágenes de satélite para representar los principales elementos y fenómenos territoriales han logrado impulsar considerablemente el desarrollo de los AC y el rediseño de las reglas de transición que limitan su potencial. La estructura ráster que presentan estas imágenes conforma un entorno perfecto para su aplicación. Estos, han sido empleados para modelar tanto los cambios en los usos del suelo (Arsanjani et al., 2011; Dietzel & Clarke, 2006; Jenerette & Wu, 2001; Liang et al., 2021) como para explorar y comprender la evolución de las áreas urbanas (Barredo et al., 2004; Cheng & Masser, 2004; Couclelis, 1997; Lau & Kam, 2005; Leao et al., 2004; White et al., 1997). En este sentido, su sencillez, su flexibilidad de adaptación, así como la facilidad de incorporación de otros métodos complementarios, hacen de los AC uno de los modelos más idóneos para su aplicación en este tipo de estudios. Concretamente, gran parte de la adecuación de los AC en las tareas de modelización de los sistemas urbanos vienen dadas por las siguientes características (White & Engelen, 2000):

- Son inherentemente espaciales, lo que los hace compatibles con gran parte de los conjuntos de datos espaciales.
- Son dinámicos, por lo que pueden representar fenómenos o procesos.

- Están basados en reglas. Estas pueden adaptarse para representar el comportamiento de un sistema territorial.
- Es un método simple y computacionalmente sencillo.

Así, a pesar de la complejidad que representan las ciudades como sistema, es posible generar representaciones razonables de las formas urbanas reales (White & Engelen, 1993). En lo que respecta a las aglomeraciones urbanas, la estructura fractal que presentan las ciudades es una componente clave tanto para desarrollar nuevas medidas morfológicas como para estudiar la organización espacial y la dinámica asociada a ellas. En esta línea, Frankhauser (1998) expone como esa geometría fractal refleja la existencia de una organización jerárquica dentro de un sistema espacial que obedece a una lógica particular, la cual funciona en el sistema de asentamientos urbanos. Además, este hecho también permite estudiar un fenómeno a diferentes escalas, ofreciendo la posibilidad de identificar umbrales críticos en la organización espacial (Frankhauser, 1998). De esta manera se ha demostrado que los AC son de gran utilidad para explorar cuestiones teóricas fundamentales sobre la dinámica y evolución de los sistemas urbanos (White & Engelen, 1993).

En cuanto a su funcionamiento e implementación en la simulación del crecimiento urbano y cambio en los usos del suelo, un modelo basado en AC funciona de tal manera que, a través de una ecuación simple, calcula el potencial de transición de una celda i para cambiar a un uso del suelo k basándose en un conjunto de normas denominadas reglas de transición. Este proceso se repite de manera iterativa, hasta cumplir el número de ciclos establecidos, los cuales representan el horizonte temporal a simular. Las reglas de transición consisten en cambiar cada celda al estado para el que tenga el potencial más elevado, hasta suplir la demanda establecida para cada uso. Puede observarse el proceso simplificado en la figura 16.

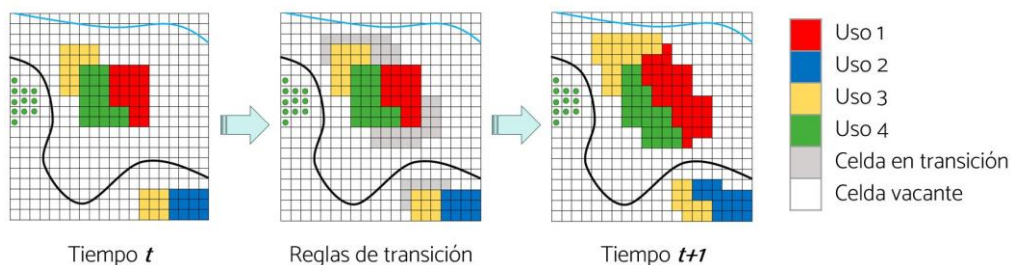


Figura 16. Representación y funcionamiento de un AC en el cambio de los usos del suelo. Fuente: Elaboración propia.

El potencial de transición viene determinado por la combinación de un conjunto de factores. Para simular el crecimiento urbano y los cambios en los usos del suelo, los más empleados son la aptitud (S), la vecindad (N) y la perturbación estocástica (v) (White & Engelen, 1997). No obstante, estos han ido evolucionando e integrando nuevas variables con el objetivo de reproducir diferentes dinámicas territoriales. El modelo más extendido se denomina $vASZN$ (White et al., 1999), también conocido como $NASZ$, el cual incluye la accesibilidad (A) y la zonificación legal del suelo en su cálculo. En conjunto, todas estas cuestiones han provocado que los AC sean una de las técnicas de modelización más empleadas en campos de estudio como el crecimiento urbano (Triantakou & Mountrakis, 2012). Los pequeños cambios realizados en las condiciones iniciales de los modelos basados en AC permiten generar resultados con cambios drásticos, proporcionando así un carácter interactivo que favorece la creación de todo tipo de escenarios (Couclelis, 1997).

3.3.4. ADAPTACIÓN DE LOS AC A LAS NUEVAS NECESIDADES DE LA PLANIFICACIÓN URBANA

Desde su primera aparición hasta la actualidad, los AC han sufrido una fuerte e incesante flexibilización para adaptarse a los retos que afronta la planificación urbana y regional. Couclelis (1997) habla de la relajación de los supuestos básicos que conforman los AC para ajustarse a los datos reales que permiten modelar las ciudades y regiones. Por su parte, Li & Gong (2016) proponen como perspectiva de mejora el ajuste de la unidad espacial básica, la incorporación de contextos temporales, las plataformas públicas de apoyo a la comparación de modelos y el análisis de escenarios. A este respecto, Barreira González (2017) hace una importante tarea de recopilación de algunos de los avances más denotados en el campo de los AC. Entre ellos, los avances en la estructura del entorno, la forma de abstraer las relaciones espaciales de vecindad, la resolución temporal y el número de usos del suelo a los que puede cambiar una celda, así como las formas de transición de un estado (uso del suelo) a otro, son algunas de las mejoras más relevantes que se han implementado en el desarrollo de esta investigación.

3.3.4.1. El entorno de los AC: del píxel a la parcela

Hasta ahora, los modelos AC más extendidos se han desarrollado sobre un entorno regular, es decir, una cuadrícula donde cada celda representa una porción equivalente del territorio. Su complementariedad, gracias a la abundante cantidad de datos que proporcionan las imágenes de satélite en formato ráster, y su idoneidad para ser representadas por una cuadrícula regular han resultado en un auge de este tipo de modelos, destacando algunos como METRONÁMICA (van Delden & Vanhout, 2018) o SLEUTH (Chaudhuri & Clarke, 2013). No obstante, dado que los sistemas complejos pueden ser muy sensibles incluso a cambios menores, es realmente deseable tener una resolución lo más alta posible de los datos urbanos (Walloth et al., 2016).

Gracias a los avances experimentados en la última década respecto a la disponibilidad de datos urbanos de detalle en formato vectorial, unido a las mejoras tecnológicas computacionales, se ha producido un importante rediseño de los modelos AC para adaptarse a las nuevas necesidades de la planificación urbana.

En el contexto urbano, O'Sullivan (2001) llevó a cabo algunos de los primeros avances en la modificación del entorno de los AC rediseñando el espacio a través de parcelas en formato vectorial y redefiniendo la vecindad mediante el empleo de grafos para representar las relaciones espaciales entre los diferentes elementos. Esta mejora fue rediseñada e implementada por Barreira-González et al. (2015) al caso español. También se pueden encontrar importantes avances en esta línea aplicados a ciudades canadienses (Jjumba & Dragičević, 2012; Stevens et al., 2007; Stevens & Dragičević, 2007), que utilizan la parcela como unidad espacial de referencia (figura 17).



Figura 17. Funcionamiento de un modelo irregular basado en AC para la simulación del crecimiento urbano utilizando la parcela catastral como unidad espacial de referencia. Fuente: Elaboración propia.

La definición de este tipo de modelos basados en AC se conoce por diferentes terminologías. Así, podemos encontrar este tipo de modelos con diferentes denominaciones, tales como *vector-based CA*, *land-parcel CA*, *graph-CA*, *irregular-CA*, etc. Esto es un claro indicador de la repercusión que ha tenido el rediseño del entorno de trabajo de los AC. Además, los trabajos disponibles sobre el empleo de AC irregulares son cada vez más numerosos (Abolhasani et al., 2016; Dahal & Chow, 2015; Lu et al., 2015; Moreno et al., 2008; Pinto & Antunes, 2010; Yao et al., 2021; Zhai et al., 2020), lo que dan a entender el éxito de esta flexibilización del AC estricto.

Las principales ventajas que presentan los modelos irregulares frente a los modelos regulares, y que han propiciado su rápida integración en el contexto de la simulación del crecimiento urbano, se describen a continuación:

- Ofrecen un nivel de detalle superior al proporcionado por los modelos AC tradicionales.
- Son independientes de la escala, por lo que no requieren aplicar análisis de sensibilidad para identificar la resolución espacial más adecuada para generar las simulaciones (Moreno et al., 2008). Esta cuestión soluciona el problema de la unidad de área modificable (Openshaw, 1983).
- Ofrecen una representación más precisa de la estructura y la forma urbana, permitiendo generar patrones más realistas de la configuración y composición espacial (Abolhasani et al., 2016; Zhai et al., 2020).

Adicionalmente, el auge de estos modelos ha estado propiciado por una mayor disponibilidad de datos vectoriales que representan la forma urbana, siendo especialmente relevante la parcela catastral, la cual ha sido empleada en numerosos estudios (Barreira-González, Gómez-Delgado, et al., 2015; O'Sullivan, 2001; Yao et al., 2017, 2021; Zhai et al., 2020).

A pesar de ello, ha habido cierto rechazo en su aplicación debido a que el uso de un espacio irregular requiere una considerable potencia de cálculo y más memoria computacional con respecto a los modelos basados en entornos regulares (ráster) para almacenar todas las relaciones entre los objetos geográficos (Barreira-González & Barros, 2017). Sin embargo, este problema ha sido tratado por diversas investigaciones. Barreira-González et al. (2015) emplean la teoría de grafos para acelerar el proceso de computación durante la ejecución del modelo. Por otra parte, se han empleado métodos de computación paralelizada y procesos de vectorización para reducir los tiempos de ejecución (Guan et al., 2015; Guan & Clarke, 2010; Li et al., 2010; Xia et al., 2017).

3.3.4.2. Los ciclos temporales

Son pocos los estudios que han explorado la resolución temporal y sus implicaciones (Liu & Andersson, 2004). En este sentido, se ha prestado poca atención al tiempo transcurrido durante una iteración en los modelos de simulación basados en AC. Una práctica común consiste en elegir un año natural como iteración temporal (Barredo et al., 2003; Barreira-González & Barros, 2017; Zhai et al., 2020). Sin embargo, existen modelos más flexibles en los que el número de iteraciones depende de la tasa de crecimiento especificada (White & Engelen, 1993), del tiempo de construcción característico de la región utilizando una resolución temporal alta (semana o mes) (Stevens et al., 2007) o de la demanda de conversión del uso del suelo para el periodo que se va a simular (Ke et al., 2016). No existe una regla que establezca el periodo de tiempo que debe abarcar una iteración en un modelo basado en la AC. El tiempo necesario para que un uso/cubierta del suelo cambie de estado puede variar enormemente en función de la categoría (urbano, forestal, agrícola, etc.) y de las características propias de la región.

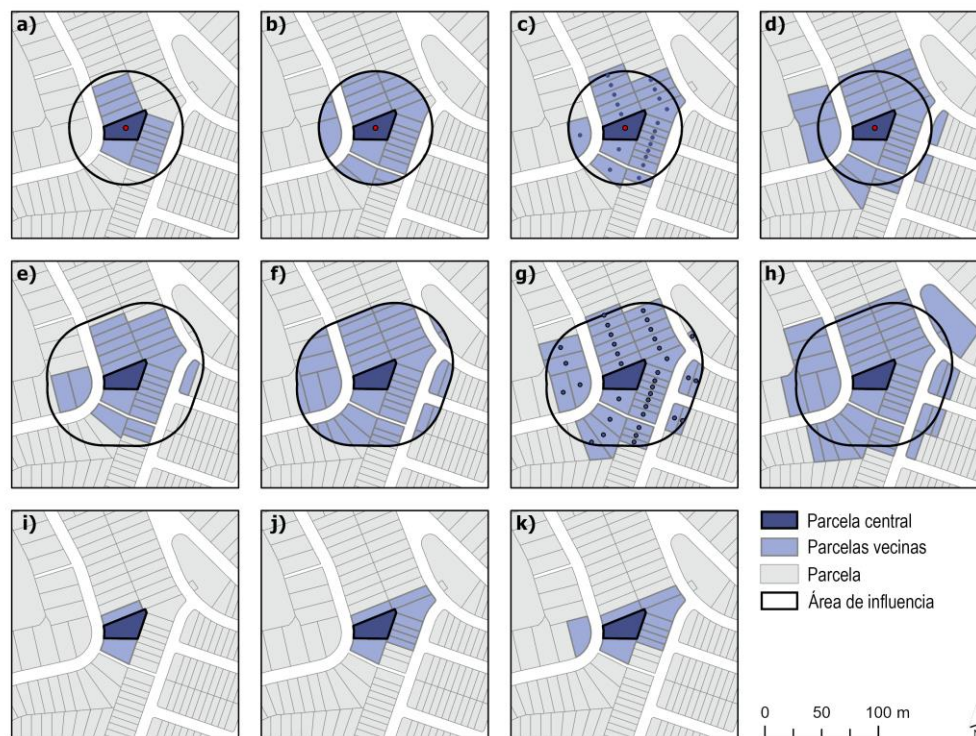
En este sentido, es importante tener en cuenta el crecimiento y la conversión del uso del suelo urbano, es decir, las implicaciones que tienen los tiempos de construcción o adaptación de determinadas edificaciones y sus funciones. Además, es de gran utilidad analizar cómo influyen

dichas iteraciones temporales en el proceso de simulación, así como en los tiempos de ejecución del modelo.

En definitiva, debería llevarse a cabo una calibración del tiempo discreto, probando con diferentes iteraciones temporales. Dependiendo del caso de estudio, un período de un año puede ser demasiado breve para determinados desarrollos urbanos, por lo que podrían ajustarse pasos temporales más largos. Esto podría ayudar significativamente a obtener tiempos de ejecución mucho más asequibles, aunque ello signifique una ligera disminución de la precisión del modelo. En casos donde se requiere una calibración completa que implica la ejecución de miles de simulaciones, el tiempo de computación pasa a ser un factor crítico para tener en cuenta.

3.3.4.3. La expresión del factor de vecindad

La vecindad reproduce los efectos de atracción/repulsión que ejercen los usos del suelo entre ellos. Los dos componentes que lo caracterizan son la definición y el efecto (Barreira-González & Barros, 2017). Concretamente, los modelos AC vectoriales utilizan buffers alrededor de cada parcela para su definición, la cual puede calcularse a partir de diferentes métodos espaciales (figura 18).



- a)* y e)** Parcelas dentro del área de influencia.
 b)* y f)** Parcelas recortadas a partir del área de influencia.
 c)* y g)** Parcelas que tiene su centroide dentro del área de influencia.
 d)* y h)** Parcelas que intersecan con el área de influencia.

- i) Vecindad topológica restringida.
 j) Vecindad de adyacencia.
 k) Vecindad de adyacencia extendida.

* Área de influencia generada a partir del centroide de la parcela central.
 ** Área de influencia generada a partir del perímetro de la parcela central.

Figura 18. Representación gráfica de los distintos métodos espaciales para definir la relación de vecindad entre las distintas parcelas que conforman entorno urbano. Fuente: Elaboración propia.

Dedicar esfuerzo a configurar adecuadamente los principales parámetros que componen la vecindad es una tarea necesaria para lograr un correcto funcionamiento de los modelos basados en AC. Dahal & Chow (2015) demuestran la sensibilidad de los resultados de las simulaciones a la configuración de la vecindad. Además, también explican que determinados tipos de vecindad pueden conducir a la aparición de un tipo específico de patrones de crecimiento urbano. En conclusión, ambos autores argumentan que la precisión espacial y los patrones morfológicos del desarrollo urbano simulado son sensibles al tipo y tamaño del barrio. Este hecho, resalta la importancia de realizar pruebas preliminares para seleccionar la definición de vecindad más que mejor se adecue a las características geográficas del caso de estudio.

3.3.4.4. Los usos del suelo y la dinámica urbana: crecimiento, conversión y pérdida

Una de las características de los AC estrictos es el estado de una celda, el cual puede identificarse como viva o muerta. Su aplicación al estudio del crecimiento urbano readapta esta idea para determinar si una celda desarrolla suelo urbano (viva) o no (muerta). No obstante, los progresivos avances realizados en esta línea han logrado adaptar la metodología para aumentar el número de estados a los que puede evolucionar una celda, identificando así cambios en los usos del suelo y conociendo sobre cuáles de ellos se desarrollará suelo urbano.

No obstante, este avance aumenta la complejidad del proceso de asignación del modelo. Tanto el número de categorías a simular por el modelo como la especificidad de dichas categorías hacen más complejo el establecimiento de las reglas de transición. Además, a mayor similitud entre categorías, mayor dificultad para simularlas (p.ej.: residencial unifamiliar vs multifamiliar).

Otra cuestión para considerar en los modelos de simulación basados en AC que emplean la parcela catastral para representar potenciales desarrollos de diversos usos del suelo urbano es su capacidad para reproducir dinámicas urbanas realistas. Estos únicamente contemplan la posibilidad de que una parcela que pertenece a la categoría no urbano desarrolle un uso del suelo funcional (crecimiento), pero este no es el único fenómeno que debe tenerse en cuenta (Zhou et al., 2016). En este sentido, no se contemplan cambios entre usos ya definidos, como puede ser la transformación de suelo industrial a residencial (conversión) o la transformación de suelo residencial a suelo vacante (pérdida o abandono).

En el contexto de la simulación prospectiva de escenarios futuros, es una tarea de vital importancia que los modelos sean capaces de generar el mayor número posible de dinámicas urbanas. Limitarse a simular crecimiento reduce la capacidad de los modelos para simular escenarios disruptivos, en los que sucesos inesperados pueden provocar la gentrificación de algunas zonas de la ciudad o el abandono de otras. Los ejemplos de procesos urbanos que implican cambios en los usos existentes del suelo urbano son numerosos. Así, en Europa Occidental, muchos centros urbanos han experimentado transformaciones, pasando de usos predominantemente comerciales e industriales a viviendas residenciales (Hamnett & Whitelegg, 2007). Un proceso inverso, pero más reciente, es la reutilización adaptativa de antiguos edificios residenciales como edificios de oficinas (Rodrigues & Freire, 2017). Del mismo modo, la regeneración urbana implica necesariamente la posibilidad de que los inmuebles se utilicen para nuevos fines. La renovación de edificios abandonados en el centro de las ciudades suele implicar un cambio de uso de, por ejemplo, uso residencial a comercial (Lami, 2020).

Adicionalmente, otros estudios recientes han agregado nuevas adaptaciones como es la variación en la información contenida por una celda en un momento determinado. El empleo de celdas mixtas permite almacenar diferentes proporciones de cobertura de múltiples tipos de uso del suelo (Liang et al., 2021). Este método podría ser especialmente relevante para determinar la proporción de funciones presentes en una parcela.

3.3.5. CALIBRACIÓN PARTICIPATIVA DE MODELOS DE SIMULACIÓN PROSPECTIVA

La calibración es el proceso mediante el cual se ajustan los parámetros del modelo para que éste reproduzca resultados similares a los observados en la zona de estudio (Camacho Olmedo et al., 2018). Los datos empleados para la calibración deben ser anteriores a la fecha de referencia (Pontius & Malanson, 2007). Esta definición de calibración hace referencia a un ajuste del modelo para que sea capaz de reproducir simulaciones basadas en la tendencia, es decir, predicciones que extrapolan el fenómeno lo más fielmente posible. Camacho Olmedo et al. (2018) argumentan que una de las tareas más importantes de la calibración es la selección de variables que puedan explicar los cambios futuros, así como la correcta configuración de los parámetros que controlan las reglas de transición.

Como se ha podido observar, el método tradicional de calibración de un modelo de simulación está arraigado a un enfoque tendencial. Sin embargo, su objetivo presenta una clara componente futura, buscando la configuración más adecuada para explicar los cambios que puedan acontecer. Bajo esta premisa, la calibración ha de entenderse como un proceso que trata de acomodar los parámetros del modelo con el objetivo de que este sea capaz de reproducir las características generales del fenómeno simulado de manera coherente, y no tanto la reproducción más fiel de la evolución lineal de un estado pasado.

Calibrar, en su sentido más estricto, es una herramienta idónea para modelos predictivos. Mientras que, para el empleo de modelos de simulación prospectiva, ha de hacerse un importante esfuerzo por readaptar el proceso de calibración. Uno de los enfoques más populares que trata de dar solución y renovar este concepto, consiste en combinar la calibración tradicional con la participación pública. Combinar la información cualitativa (opinión y conocimiento de las partes interesadas) con la cuantitativa (modelización) ofrece oportunidades únicas para aunar información relevante, lograr rigor científico, aumentar la imaginación y adquirir experiencia desde distintas perspectivas (Volkery et al., 2008).

Hewitt et al. (2014) emplean una metodología de investigación y acción participativa para romper la barrera entre el investigador y el participante, comprometiendo a las partes interesadas en el proceso de resolución de problemas. Esta combinación del conocimiento analítico/técnico que poseen los investigadores se ve complementado por los conocimientos de tipo discursivo que se logran a través de la participación de la población local (figura 19). Es una tarea que involucra a las partes interesadas en las diferentes etapas de la simulación y concretamente en la calibración.

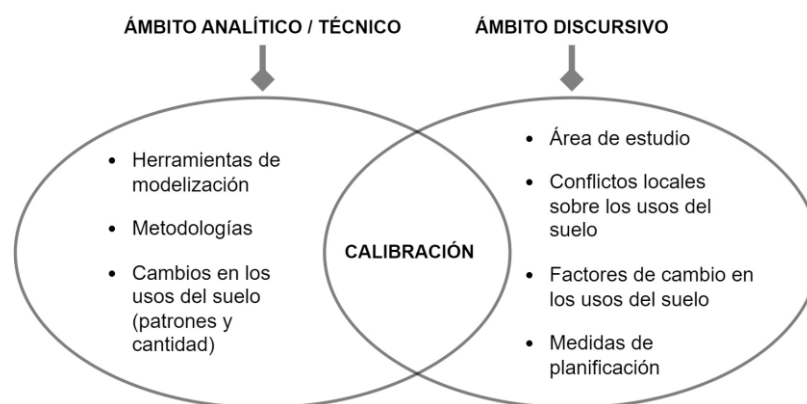


Figura 19. Combinación de conocimientos derivados del ámbito analítico/técnico y del ámbito discursivo para una adecuada calibración. Extraído y adaptado de Hewitt et al. (2014).

Involucrar enfoques participativos en el desarrollo de escenarios ha sido un avance que ha ido adquiriendo cada vez más importancia en los últimos años. Así se observa en la literatura, donde un elevado número de trabajos emplean este tipo de procesos como instrumento complementario a la modelización (Harb et al., 2020; Hewitt et al., 2014; Kok & van Delden, 2009; Lippe et al., 2011; van Delden & Hagen-Zanker, 2009; White et al., 2004). Para corroborar la importancia de la metodología descrita, se describen a continuación los principales argumentos presentados por Volkery et al. (2008), según los cuales la participación ayuda a:

- Dar acceso a conocimientos y experiencias prácticas, conocer nuevas percepciones de los problemas e identificar nuevas cuestiones que supongan un reto.
- Eliminar las barreras existentes entre las comunidades científicas y los gobiernos, empresas, grupos de interés o ciudadanos, proporcionando así una comprobación de la realidad de los supuestos y la metodología de la investigación.
- Mejorar la comunicación entre científicos y partes interesadas, facilitando la colaboración y el consenso en la resolución de problemas.
- Aumentar la relevancia y legitimidad del escenario y, por tanto, su aceptación entre los usuarios finales.

De entre los métodos más extendidos para integrar la participación en el proceso de modelización, la creación de talleres es el más empleado. Este permite desarrollar de manera discursiva, interactiva y dinámica cualquier otra actividad (método Delphi, tormenta de ideas, cartografía colaborativa, etc.) que pueda favorecer un proceso de simulación más completo. En esta línea, Walz et al. (2007) involucraron a responsables políticos y representantes oficiales de grupos interesados, así como representantes del público en general junto con los investigadores para debatir y adaptar sus comentarios a los escenarios. Harb et al. (2020) celebraron dos talleres participativos en colaboración con los planificadores urbanos municipales. En total, 30 partes interesadas locales participaron en los talleres, incluidos representantes del gobierno local, el gobierno regional y la sociedad civil. Su objetivo era generar mapas que apoyaran el proceso de simulación de escenarios de crecimiento urbano. Hewitt et al. (2014) desarrollaron dos talleres participativos con un grupo de 14 participantes interesados. Otro ejemplo destacable es la investigación realizada por Guan et al. (2011) dedicada a modelar el cambio de uso del suelo urbano. En dicho estudio se invitó a 23 expertos pertenecientes a campos de la ordenación del territorio, el urbanismo y las ciencias ecológicas para determinar la importancia relativa de los factores que influyen en el fenómeno urbano. El objetivo de esta acción consistió en generar mapas de potencial de transición.

De entre todos los estudios mencionados que integran enfoques participativos en la simulación de escenarios de cambio de usos del suelo, gran parte de ellos destinan todos sus esfuerzos al proceso inicial y final de la planificación de escenarios, es decir, a visualizar imágenes futuras por parte de la población local y las partes interesadas y, finalmente, a evaluar y/o analizar los resultados finales de la simulación de escenarios. No obstante, pocas investigaciones involucran a las partes interesadas en el proceso de calibración, a pesar de que esta tarea supone una importante mejora en los resultados (Guan et al., 2011; Hewitt et al., 2014).

Es evidente que no se puede implicar en el proceso de calibración a aquellos individuos que no presentan un perfil investigador, dada la componente técnica de este proceso. Sin embargo, dada la relevancia de este paso en la simulación, es de gran importancia destinar parte del tiempo a colaborar con las partes interesadas para obtener información y conocimiento local que mejore el ajuste de los parámetros de las reglas de transición. A este respecto, actividades como la cartografía participativa (Cochrane & Corbett, 2018; Romanillos, 2016) o la cartografía web colaborativa (Kingston et al., 2000) son algunos de los instrumentos enmarcados dentro de la

participación pública combinada con SIG (PPGIS, *Public Participation Geographic Information System*) (Ghose, 2018), que facilitan el desarrollo de este proceso.

3.3.6. VALIDACIÓN PARCIAL DE MODELOS DE SIMULACIÓN PROSPECTIVA

Junto con la calibración, la validación es otra fase característica de los métodos de simulación. De ella depende la credibilidad del modelo (Camacho Olmedo et al., 2018). Su función principal consiste en evaluar la precisión del modelo a partir de los resultados derivados de la simulación. Tras la calibración, y antes de realizar una simulación a futuro, se realiza una previa simulación de un periodo ya conocido para determinar el grado de similitud de la fecha final simulada con la situación real. Este proceso indica si el modelo es o no robusto para un determinado fin, pero no proporciona la certeza de que las simulaciones a futuro que genere dicho modelo vayan a ser una realidad si se cumplen las condiciones establecidas.

Hasta la fecha, no existe un método infalible que permita validar los escenarios prospectivos simulados ya que no hay realidad con la que compararlos. Triantakonstantis & Stathakis (2015) describe este problema como una de las limitaciones de los modelos: «*La base de la simulación de un modelo es el pasado. Pero el pasado no siempre es el mejor motor para predecir las transiciones futuras. Los cambios urbanos entre un periodo de tiempo y otro pueden ser diferentes de los que se produzcan en el futuro*».

Ante esta limitación, algunos autores tratan de enfocar el proceso de validación en la tarea de determinar que todos los componentes empleados por el modelo son robustos e intervienen en una proporción considerable a la simulación. Barreira-González et al. (2015) propone una validación parcial de escenarios futuros simulados con un modelo basado en AC. Esta consiste en el empleo de una metodología basada en la simplificación de los métodos de Análisis de Sensibilidad Global (Saltelli et al., 2000). No se introducen variaciones probabilísticas en los factores de entrada. En su lugar, se realiza una eliminación progresiva de los factores originales, con un diseño factorial completo, y se calcula el resultado del modelo para todas las combinaciones posibles de los factores de entrada. Por consiguiente, la comparación de los resultados espaciales obtenidos a partir de las distintas combinaciones de simulaciones permite determinar en qué difieren, evaluar su solidez y analizar con facilidad las posibles implicaciones espaciales resultantes para la zona estudiada (Barreira-González et al., 2015). Así lo remarcan Gómez Delgado & Rodríguez Espinosa (2012) al incidir en la importancia de analizar la incidencia de los distintos factores de un modelo basado en AC para comprobar la robustez y estabilidad de los resultados como un método apropiado de validación parcial.

Esta metodología ha sido previamente aplicada al modelo de simulación del crecimiento urbano basado en AC vectoriales desarrollado por Barreira-González et al. (2019) en el trabajo de (Urgilez Clavijo et al., 2019). En él, se demuestra la viabilidad de la aplicación de esta metodología en este tipo de entorno irregular. Los resultados de dicho estudio señalan la importancia de los factores de vecindad y accesibilidad como principales implicados en la generación de resultados.

En definitiva, es importante hacer este ejercicio de validación, aunque sea de manera parcial, ya que permite conocer en profundidad la capacidad de simulación del modelo respecto a los parámetros introducidos y, por tanto, la lectura e interpretación de los resultados se llevaría a cabo de una manera más informada. Por ello, en el desarrollo de esta investigación se reserva una sección orientada a tratar este tema con mayor detalle.

3.4. CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN ESPACIAL DE ESCENARIOS URBANOS

Los futuros patrones urbanos son el resultado de las decisiones tomadas por una multitud de agentes (Ritsema van Eck & Koomen, 2008). Por dicha cuestión, influir en dichos patrones se ha considerado uno de los objetivos directos de la planificación urbana. Así, si se desea influir en dichos patrones, previamente es necesario comprender y cuantificar los cambios en los usos del suelo. Para ello, es necesario contar con instrumentos técnicos capaces de evaluar y valorar la sostenibilidad de los modelos urbanos enfocados a simular escenarios futuros diversos (Gómez Delgado & Rodríguez Espinosa, 2012) y de desarrollar indicadores válidos y fiables de la consecución de los objetivos espaciales pertinentes (Ritsema van Eck & Koomen, 2008).

En la investigación geográfica, el análisis de las estructuras y patrones espaciales es un aspecto fundamental. Herold et al. (2005) alegan que las métricas espaciales que miden la composición y el patrón del paisaje urbano son medidas esenciales para entender la función del paisaje. Estas métricas, diseñadas inicialmente para vincular las estructuras del paisaje con sus funciones ecológicas, también pueden ser empleadas como medidas cuantitativas de las características espaciales de los paisajes urbanos. En esta misma línea, su utilidad se centra en su capacidad para interpretar y evaluar los resultados obtenidos de modelos de simulación (Herold et al., 2005). Como ejemplo, Aguilera et al. (2011) aplican métricas espaciales sobre tres escenarios urbanos simulados con un modelo basado en AC. En dicho trabajo señalan la utilidad de las métricas espaciales en la planificación territorial para la cuantificación de las características espaciales del crecimiento urbano en las áreas metropolitanas del sur de Europa. Este tipo de herramientas, además de ser capaces de analizar los valores de los índices para distintos escenarios, permiten inferir si las mejoras producidas por la planificación son significativas o, por el contrario, no repercuten en el camino establecido para alcanzar los objetivos (Franco et al., 2005). De esta manera, se puede afirmar que cuantificar los procesos espaciales del crecimiento urbano mediante métricas de paisaje permite medir los cambios de ocupación de cada escenario, y asociar a cada uno de ellos patrones de dispersión, compactación o estabilidad (Aguilera et al., 2011).

3.4.1. LAS MÉTRICAS DE PAISAJE EN LA CARACTERIZACIÓN DE LOS PATRONES URBANOS

Las métricas del paisaje tienen un origen previo a su aplicación en la ecología del paisaje (Forman, 1995). No obstante, su mayor auge se debe al interés adquirido dentro de este ámbito gracias a la publicación de *Indices of landscape pattern* (O'Neill et al., 1988), publicación que desarrollaba nuevas métricas basadas en la teoría de la información y la geometría fractal (Forman, 1995). La ecología del paisaje sostiene que los patrones ambientales ejercen una influencia significativa en los procesos ecológicos. Además, las acciones humanas pueden interferir en la estructura del paisaje, comprometiendo la integridad funcional del propio ecosistema. Por esta razón, se desarrollaron métodos capaces de medir los patrones del paisaje y que permitiesen estudiar las relaciones entre patrón y proceso (McGarigal, 2012).

Las métricas de paisaje describen la estructura espacial de un paisaje en un momento determinado y proporcionan información cuantitativa sobre los contenidos del mosaico, como la proporción de cada tipo de categoría presente en el área de estudio, o la forma de los elementos que forman el paisaje (Botequilha Leitão & Ahern, 2002). Generalmente, en los estudios sobre ecología del paisaje, se les ha denominado métricas de paisaje a aquellas que están explícitamente relacionadas con las funciones ecológicas (Luck & Wu, 2002). Poco a poco, esta disciplina se ha ido infiltrando en otros estudios y, en especial, en los estudios urbanos y regionales (Frazier & Kedron, 2017). De esta manera, el concepto de métricas espaciales ha ido adquiriendo fuerza, haciendo referencia a aquellos índices espaciales que tienen un enfoque orientado a caracterizar la forma urbana (Herold et al., 2003). Este auge se debe principalmente a dos cuestiones fundamentales. En primer lugar, el patrón espacial de la forma urbana afecta a los procesos físicos, ecológicos y

socioeconómicos de la ciudad, dentro y fuera de sus límites (Luck & Wu, 2002). En segundo lugar, la evidencia en cuanto a que el proceso de urbanización es uno de los fenómenos que más transforman el suelo y la propia estructura del paisaje. Ambas cuestiones han provocado que el número de estudios orientados a analizar la forma urbana mediante el uso de métricas espaciales no haya parado de crecer en las dos últimas décadas (Aguilera-Benavente et al., 2011; Aguilera-Benavente et al., 2014; Herold et al., 2003, 2005; Lowry & Lowry, 2014; Luck & Wu, 2002; Vanderhaegen & Canters, 2017).

Atendiendo a la estructura del paisaje urbano podemos distinguir dos componentes básicos: a) composición y b) configuración (Botequilha Leitão & Ahern, 2002; McGarigal, 2012). La composición no mide ni refleja la geometría de los elementos espaciales ni su ubicación geográfica, sino que mide características de los tipos de usos y/o coberturas del suelo que componen el paisaje como la proporción, la riqueza, la uniformidad y la diversidad. Por otra parte, la configuración se refiere a las características espacialmente explícitas de los elementos, como la forma, el tamaño, la ubicación y la orientación. Bajo estos dos componentes básicos es posible analizar dos características urbanas que son el foco de atención de los nuevos retos que afronta dicha tarea: el modo de expansión y la forma en la que se organizan en el espacio las distintas funciones de la ciudad. No obstante, el empleo de una única métrica de manera independiente no permite capturar todas las características del paisaje. Por tanto, la combinación de métricas de configuración espacial y composición ofrece unos resultados más completos y detallados del fenómeno en cuestión (Luck & Wu, 2002).

El uso de métricas espaciales para representar y medir la heterogeneidad del paisaje se ha explorado ampliamente a través del modelo tesela – corredor – matriz. A pesar de las importantes ventajas de este paradigma, como su estructura simplificada y la facilidad de análisis, diseño y gestión con métodos robustos y bien desarrollados, las discontinuidades que figuran en la representación del paisaje no reflejan la realidad de las variaciones reales de la heterogeneidad espacial (Frazier & Kedron, 2017). Como alternativa, el modelo de gradientes ofrece un enfoque más adecuado que incorpora un concepto jerárquico y multiescalar para representar la continuidad inherente de los factores espaciales (figura 20) (Mcgarigal & Cushman, 2005). En definitiva, cuando el modelo tradicional no es apropiado para representar la variabilidad de determinados factores territoriales, modelar dicha variación a través de gradientes continuos que varían individualmente presenta diversas ventajas. Mcgarigal & Cushman (2005) identifican las siguientes:

- Mantiene la heterogeneidad de los valores de las variables a través del espacio y de la escala.
- Permite conservar en el análisis muchas variables que varían de forma independiente, en lugar de reducir el conjunto a una descripción categórica de límites definidos sobre la base de un atributo (o unos pocos).
- Facilita la tarea de asociar patrones espaciotemporales de escala continua con variables de respuesta continua.

La generación de superficies continuas definidas por el modelo de gradientes se lleva a cabo mediante la aplicación de ventanas móviles. Éstas analizan el espacio circundante de cada unidad espacial, calculan la métrica en cuestión para dicha unidad en función de los usos y coberturas del paisaje en dicha ventana y, finalmente, le asignan un valor local. El tamaño y la forma de la ventana móvil pueden ajustarse, reflejando la escala a la que influye el fenómeno estudiado. Incluso en los paisajes urbanos, donde las actividades humanas pueden presentar una configuración categórica mejor definida que los entornos naturales, el modelo de gradiente supone un avance significativo el cual ayuda a representar con mayor precisión y realismo los patrones urbanos (Luck & Wu, 2002; Vizzari & Sigura, 2013).

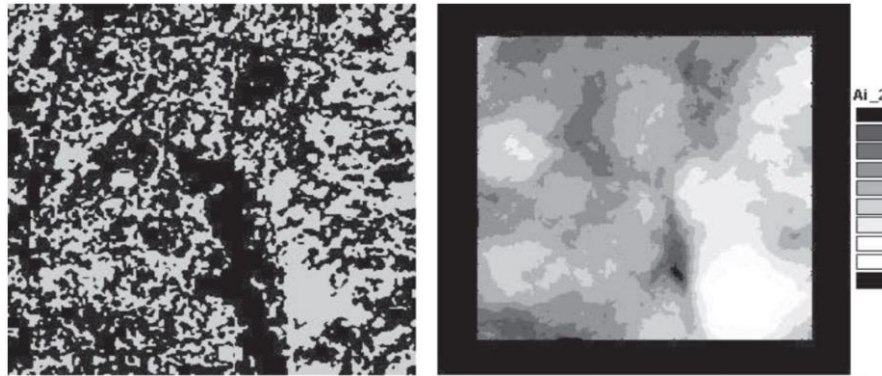


Figura 20. A la izquierda, cálculo global de una métrica del paisaje para una categoría (mapa binario). A la derecha, cálculo basado en la vecindad de la misma métrica de paisaje mediante ventana móvil (mapa de superficie continua). El borde negro representa los píxeles sin datos con una profundidad igual al tamaño de la ventana móvil. Fuente: Cushman et al. (2010).

3.4.2. EVALUACIÓN DE LOS PATRONES DE EXPANSIÓN URBANA

Cuantificar los patrones del paisaje y sus cambios mediante el empleo de métricas espaciales vectoriales es esencial para el seguimiento y evaluación de las consecuencias ecológicas del proceso de urbanización. Por esta razón, las métricas espaciales se han extendido en este campo con fines muy diversos, tales como la caracterización de patrones urbanos para apoyar el diseño de políticas en planificación, la comparación de patrones físicos, o la comprensión de los patrones espaciotemporales del desarrollo urbano (Reis et al., 2016). En esta línea, Tian et al. (2022) señalan la importancia de determinar los parámetros cuantitativos que describen el patrón de expansión urbana en la planificación y gestión de estas áreas.

Según Ewing & Hamidi (2015), las áreas urbanas pueden crecer de forma dispersa o compacta, provocando patrones muy diversos. Este comportamiento genera impactos significativos sobre el suelo, a menudo irreversibles (Bhatta, 2010). Su evolución espacial es especialmente visible durante el proceso de difusión y coalescencia. Tal y como describe Dietzel et al. (2005), dicho modelo hipotético comienza con la expansión de un área urbana principal, que se va expandiendo hacia nuevos núcleos urbanos periféricos (figura 21). Este proceso de difusión se acompaña de un crecimiento orgánico que lleva a la expansión hacia áreas no urbanizadas. En las primeras fases de la difusión, las distancias entre los vecinos más próximos de las distintas zonas urbanas son las más elevadas y disminuyen hasta que se asignan más urbanizaciones individuales, produciéndose así un pico en la densidad de las áreas urbanas circundantes. Al inicio de la fase de coalescencia, la disminución de las distancias entre vecinos más próximos es menos significativa, ya que las áreas urbanas próximas son las primeras en agregarse espacialmente debido a un proceso de relleno (Dietzel et al., 2005). Una vez finalizada la etapa de coalescencia, el sistema urbano se transforma en una entidad mayor, incrementando su influencia territorial y produciéndose un salto de escala, a partir del cual dicho proceso puede volver a repetirse con unas dimensiones significativamente mayores. Este proceso puede estudiarse utilizando métricas espaciales, así como los patrones que genera en lo que respecta al tipo de expansión (Herold et al., 2005; Jiang et al., 2007; Sudhira et al., 2004). Como ejemplo, Reis et al. (2016), mediante el uso de métricas espaciales simples basadas en medidas geométricas, indicadores complejos, o mediante el empleo de medidas estadísticas, identifica cuatro grupos que se corresponden a los principales procesos de cambio y crecimiento urbano: (1) expansión, (2) dispersión, (3) policentrismo y (4) densificación/coalescencia. Así, dada la importancia de la componente espacial para identificar los principales procesos que caracterizan dicho fenómeno, las métricas de configuración espacial son idóneas para realizar un análisis detallado de la evolución del crecimiento urbano.

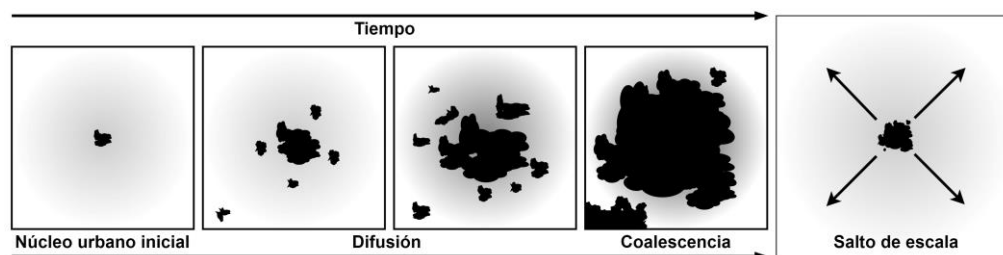


Figura 21. Evolución espacial hipotética de las áreas urbanas. Extraído y adaptado de Dietzel et al. (2005).

Respecto a la disponibilidad de índices espaciales desarrollados para conjuntos de datos vectoriales que sean capaces de cuantificar las características de los patrones urbanos a partir de la parcela catastral, es posible encontrar un amplio catálogo de métricas de configuración espacial. El área de la mancha urbana y su borde, la complejidad de la forma de la mancha urbana, el área central, el contraste, la agregación, la fragmentación y el aislamiento son algunas de ellas (McGarigal, 2012). En su conjunto, estas métricas permiten caracterizar en profundidad el paisaje urbano en la mayor parte de sus dimensiones. Sin embargo, estos índices paisajísticos convencionales únicamente reflejan las características espaciales de un único momento temporal. Para cuantificar cambios dinámicos en dos o más puntos temporales Liu et al. (2010) propone *Landscape Expansion Index (LEI)*, un índice espacial que capta información de los procesos de formación de los patrones urbanos. Así, entendiendo que los patrones espaciales varían en función de dónde se produce un nuevo crecimiento en relación con las zonas urbanas existentes, Liu et al. (2010) identifica tres tipos de crecimientos: a) *relleno*, es decir, cuando los huecos vacantes entre las áreas urbanas existentes se rellenan nuevas edificaciones, b) *expansión de los bordes*, es decir, cuando los nuevos crecimientos urbanos se extienden junto a los límites de las zonas urbanas periféricas adyacentes a zonas no urbanas, y c) *crecimiento aislado o espontáneo*, es decir, cuando los nuevos crecimientos urbanos se desarrollan formando nuevas áreas urbanas no adyacentes a ninguna otra.

Tanto la clasificación de los tipos de crecimientos como la componente temporal son cuestiones que hacen de LEI una métrica espacial idónea para el estudio de la expansión urbana de los escenarios futuros simulados. En este contexto, son necesarios nuevos avances que permitan caracterizar los tipos de crecimiento urbano a escala local, concretamente a nivel de parcela. De este modo, sería posible hacer un estudio multitemporal de detalle de los procesos de difusión y coalescencia que señalan Dietzel et al. (2005), logrando un mayor entendimiento de la evolución de las áreas urbanas y los factores que influyen en sus dinámicas espaciales.

3.4.3. EVALUACIÓN DE LOS PATRONES DE DIVERSIDAD URBANA

La diversidad urbana, estudiada a través de la mezcla de usos y funciones de la ciudad (figura 22), es una componente clave para entender las dinámicas de las ciudades y regiones, así como su evolución futura. Se considera que una elevada mezcla de usos del suelo puede resolver problemas urbanos como la elevada demanda de recursos territoriales y la acelerada expansión urbana. Además, es capaz de promover un desarrollo urbano sostenible (Yang et al., 2021).

El concepto de mezcla implica que los diferentes usos y/o funciones urbanas cercanas influyen mutuamente unas sobre otras en un ámbito espacial limitado. Por lo tanto, todas las medidas que calculan el grado de mezcla de usos del suelo urbano contienen implícita o explícitamente dos conceptos: distancia y cantidad (Song et al., 2013). En este sentido, el carácter espacial y la asociación de la abundancia y variedad de elementos hacen de las métricas de composición un método adecuado para cuantificar la diversidad urbana. No obstante, dado que la composición

requiere la integración de todas las clases (usos del suelo), estas medidas sólo se han aplicado a nivel de paisaje, tanto en formato ráster como en formato vectorial.

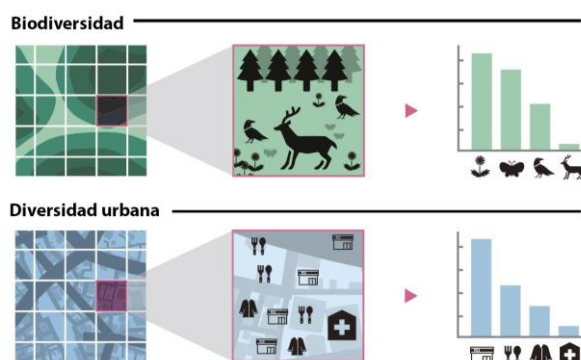


Figura 22. Diagrama que muestra el cálculo de un índice de diversidad para el estudio de la biodiversidad de especies (arriba) y la mezcla de usos y funciones de la ciudad (abajo). Extraído y adaptado de Yoshimura et al. (2021).

Song et al. (2013) realiza una revisión detallada de varias medidas de mezcla de usos del suelo, incluyendo medidas adaptadas de otras disciplinas. Además, realiza una comparativa entre las diversas medidas sobre su base conceptual y matemática. Dichos autores llegan a la conclusión de que no existe una métrica adecuada para cualquier contexto, ya que esta depende del número de categorías de interés, el número de dimensiones a analizar, la escala y la información disponible.

Otro componente clave en el estudio de los patrones de diversidad a través de métricas espaciales es la escala. Este es un factor del que depende la selección de las distintas medidas de cálculo de mezcla de usos del suelo urbano. Inclusive, cabe mencionar que la mayoría de las métricas de paisaje son dependientes de la escala, con resultados que varían en función de la resolución espacial (Aguilera et al., 2011; Botequilha Leitão & Ahern, 2002; He et al., 2000). Ante dicha situación, se presentan dos retos para lograr una adecuada caracterización de la diversidad urbana a escala local. Por una parte, la adaptación de las métricas espaciales de composición para lograr proporcionar un valor de diversidad o heterogeneidad a nivel de parcela y, por otra parte, el ajuste de la escala adecuada para reflejar la influencia de unos usos sobre otros. Esta metodología emplea técnicas de ventana móvil para detectar los efectos de escala. Así, a través de la identificación de un umbral, permite diferenciar la microescala de la mesoescala. En la microescala, los valores son superiores al umbral establecido, lo que permite detectar efectos locales. Mientras que, en la mesoescala, donde los valores son inferiores a dicho umbral, la tendencia de la heterogeneidad depende cada vez menos al tamaño de la ventana móvil, lo que muestra una tendencia a la autosimilaridad en la escala (Díaz-Varela et al., 2009).

Gracias a esta metodología, es posible aplicar las distintas métricas de composición a otros niveles de la organización jerárquica de la heterogeneidad espacial. Aunque las métricas de diversidad se apliquen generalmente a nivel de paisaje debido a que se requiere la integración de todas las categorías, el empleo de ventanas móviles hace posible el cálculo de la heterogeneidad local de un elemento individual observando su entorno. Varios estudios analizan la mezcla de usos del suelo urbano a escala de sección censal o conjuntos de manzanas como unidad para su análisis (Brown et al., 2009; Comer & Greene, 2015; Manaugh & Kreider, 2013; Talen, 2005; Wo, 2019), a pesar de ser criticado como un método tosco de agregación (Poudyal et al., 2009). Por otra parte, Yoshimura et al. (2021) realizan un análisis a nivel de barrio. Yang et al. (2021) evalúan los usos

mixtos del suelo a nivel de manzana. Y Bordoloi et al. (2013) estudian la posibilidad de cuantificar la mezcla de usos del suelo urbano a nivel de edificio, calle y barrio.

No obstante, agregar la información a unidades espaciales delimitadas no físicas (como las secciones censales) para calcular métricas espaciales impide captar la realidad del barrio (Poudyal et al., 2009). Algunos elementos muy cercanos al punto focal pueden no estar incluidos en el área de agregación debido al problema que presentan los límites de las secciones censales (Moser et al., 2007). Una práctica habitual para abordar este problema es el uso de buffers. Este método considera todo lo que se encuentra dentro de un radio definido, pero no tiene en cuenta las posibles barreras (carreteras, vías férreas, ríos, etc.) que limitan la influencia existente entre los distintos usos del suelo, incluyendo en el valor de la métrica espacial ciertas zonas que pueden no ejercer influencia. No obstante, este método resulta de fácil aplicación gracias a al empleo de ventanas móviles y a la fácil reconfiguración del tamaño de la ventana para su adaptación a diversas escalas.

3.4.4. ADAPTACIÓN DE MÉTRICAS DE PAISAJE A CONJUNTOS DE DATOS VECTORIALES

Tradicionalmente, los mapas de usos y coberturas del suelo se generan a partir de imágenes de satélite, sobre las cuales se emplean algoritmos de clasificación basados en píxeles. En consecuencia, las imágenes ráster se han convertido en el formato de datos de salida más común en los modelos de simulación urbana (Aguilera et al., 2011; Barredo et al., 2004; Herold et al., 2005). Así, la mayoría de los estudios que aplican métricas de paisaje para evaluar escenarios futuros de cambios en los usos del suelo trabajan con esta misma estructura de datos.

A pesar de ello, el desarrollo de métodos de análisis espacial y de técnicas de modelización que emplean datos vectoriales es cada vez mayor. Además, tanto las nuevas técnicas de análisis de imágenes basadas en objetos, como otras técnicas más antiguas de fotointerpretación, generan como resultado entidades vectoriales. Durante este proceso, los píxeles se agrupan primero en objetos y luego los objetos se clasifican como una sola unidad poligonal (formato vectorial) (Maclean & Congalton, 2013).

En la actualidad, muchas bases de datos geográficas, incluidos los mapas de usos y coberturas del suelo, las divisiones administrativas y parcelario catastral, almacenan sus datos en formato vectorial (Maclean & Congalton, 2013). Además, los datos vectoriales son cada vez más importantes en los estudios urbanos, ya que representan la forma urbana de una manera más realista, siendo esta una variable clave para el estudio de la complejidad urbana (Rueda Palenzuela et al., 2022; Salvati & Carlucci, 2020) y el crecimiento urbano (Tian et al., 2022). Todas estas cuestiones derivan en la necesidad de métodos de análisis espacial que se apliquen directamente sobre conjuntos de datos vectoriales y que proporcionen información sobre las características urbanas mencionadas a nivel de la entidad vectorial analizada (ver ejemplos de métricas espaciales vectoriales en las figuras 23 y 24).

Algunas alternativas más sencillas han optado por transformar dicha información al formato ráster para reutilizar los métodos existentes. Sin embargo, son varias las desventajas que derivan de esta actuación. La conversión de datos puede suponer la modificación de los límites entre teselas contiguas del mismo tipo, cambios en su forma y alteración de las relaciones espaciales entre las teselas del paisaje (Corry & Nassauer, 2005). Estos procesos pueden afectar al análisis final. Además, la precisión de los datos puede disminuir tras aplicar el proceso de conversión.

Otro hecho que reitera la necesidad de este tipo de herramientas es la proliferación de modelos de AC vectoriales (Abolhasani et al., 2016; Barreira-González et al., 2019; Moreno et al., 2008; Yao et al., 2017, 2021). Por tanto, desarrollar o adaptar métricas espaciales para ser aplicadas directamente sobre datos vectoriales permite conservar la estructura vectorial original, evitando

la necesidad de aplicar operaciones de generalización cartográfica asociadas al formato ráster (Yao et al., 2022). En la actualidad existen diferentes softwares que calculan métricas espaciales para conjuntos de datos vectoriales (tabla 3).

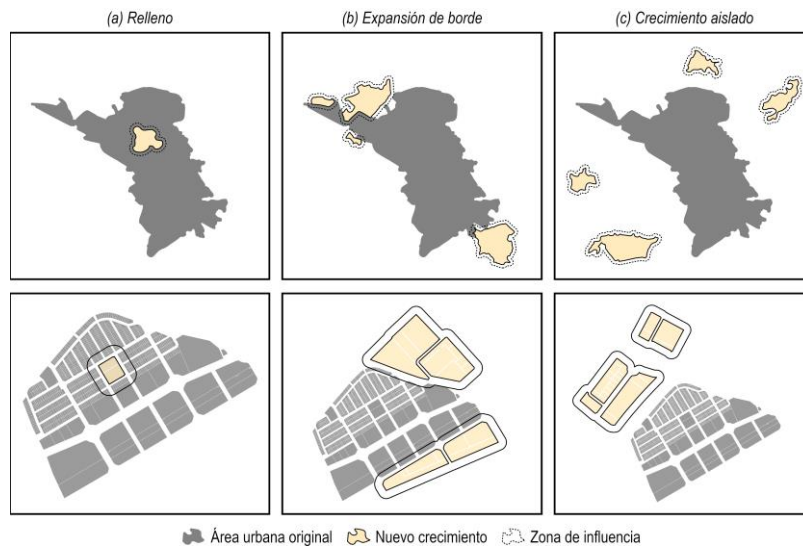


Figura 23. Adaptación de LEI al conjunto de datos vectoriales para la identificación de los tipos de crecimiento durante el proceso de expansión urbana. Fuente: Elaboración propia.

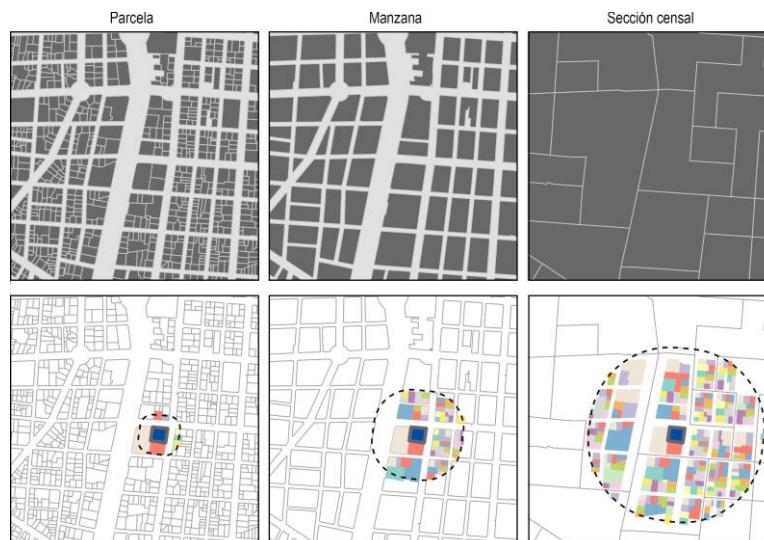



Figura 24. Adaptación del cálculo de diversidad urbana a conjuntos de datos vectoriales empleando distintos tamaños de ventana móvil. Fuente: Elaboración propia.

A pesar de los importantes avances en esta línea de investigación, aun se requieren importantes mejoras para evaluar y caracterizar escenarios futuros disruptivos de crecimiento y cambios en los usos del suelo urbano. Por una parte, aunque el uso de las ventanas móviles está muy extendido en las métricas del paisaje sobre datos ráster, esta técnica aún no se ha implementado sobre datos vectoriales de manera automatizada y dinámica. Por otra parte, respecto a los niveles de aplicación de las métricas espaciales establecidos por Yao et al. (2022) en el formato vectorial, aún existen ciertas carencias en la aplicación de métricas de composición y configuración espacial a nivel de clase o parcela. Concretamente, en los softwares analizados de la tabla 3, el número disponible

de métricas de configuración espacial calculadas a nivel de parcela es muy escaso, siendo inexistentes aquellas que analizan la composición a este mismo nivel de aplicación.

Tabla 3. Software basados en el cálculo de métricas de paisaje de datos vectoriales.

Software	Autores	Año	Enlace
vLATE	Lang & Tiede	2003	https://sites.google.com/site/largvlate/gis-tools/v-late
Patch Analyst (PA4 beta)	Rampel	2008	https://learn.opengeoedu.de/en/monitoring/landscraftstrukturmasse/software/patch-analyst-arcmap-plugin
Land-metrics DIY	Zaragozí et al.	2012	https://github.com/benizar/landmetrics_diy
IncSIM	No disponible	2012	https://zoz.cbk.waw.pl/incsim-aplikacja-do-obliczania-wskaznikow-krajobrazu/
PolyFrag	Maclean & Congalton	2013	https://www.landportal.org/es/library/resources/agrisus201500210940/polyfrag-vector-based-program-computing-landscape-metrics
Arc_LIND	Yu et al.	2019	No disponible.
VecLI	Yao et al.	2022	https://www.urbancomp.net/archives/vecliv3beta



«Para nosotros, tan digna de consideración es una urbe de diez hectáreas como una de diez mil: todas son urbes, todas dan albergue a la humanidad y solo hay que desear que en todas fuese igualmente bien atendida».

Ildefonso Cerdá

Capítulo 04

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN



CAPÍTULO 04



DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

El desarrollo de esta tesis doctoral se articula en un total de cinco secciones. Las tres primeras se corresponden con tres publicaciones científicas en revistas internacionales. La cuarta sección extiende los conocimientos presentados en una comunicación de una conferencia internacional. Por último, la quinta cuenta con una publicación científica en estado de revisión. En conjunto, todas ellas forman el cuerpo principal del desarrollo de la investigación. En la figura 25 se recogen los diferentes artículos publicados y su relación con los objetivos planteados.

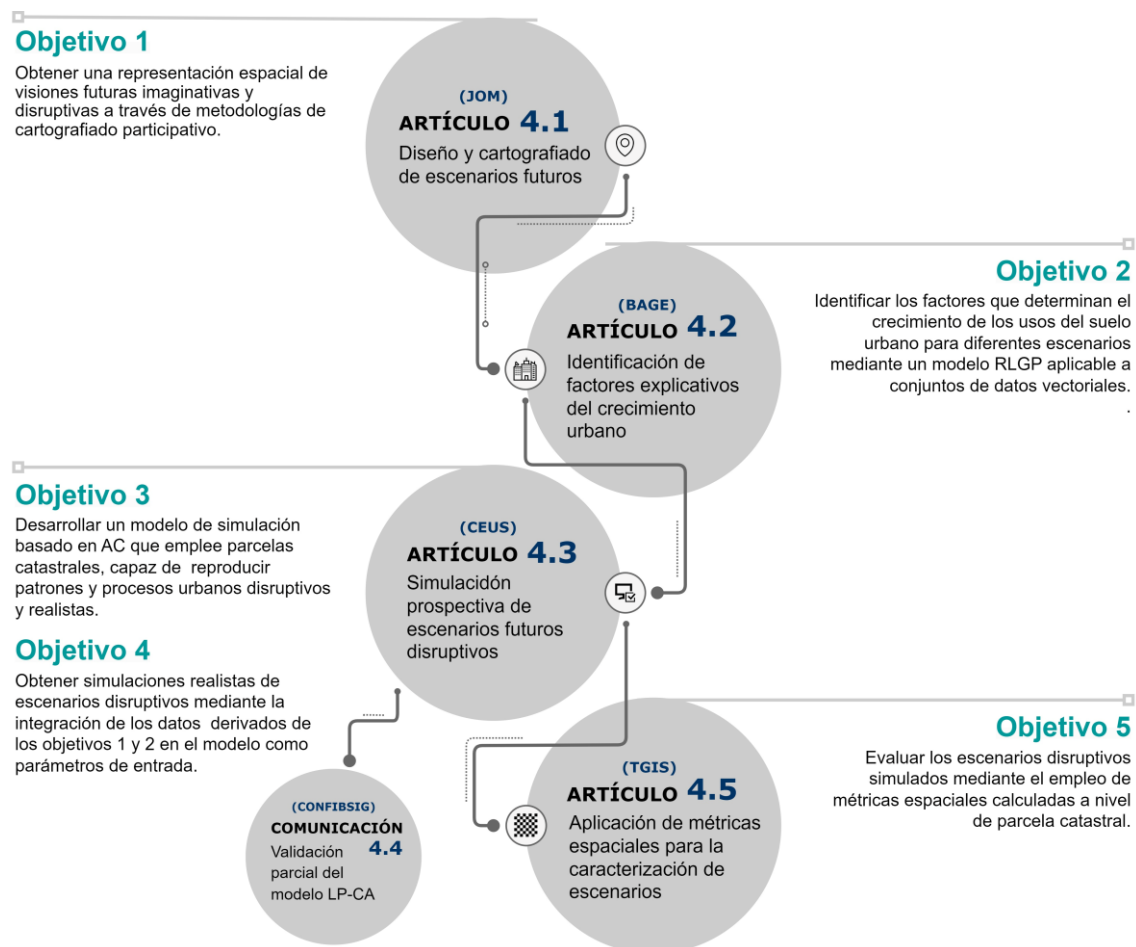


Figura 25. Esquema del desarrollo de la investigación estructurado a partir de las publicaciones científicas y su relación con los objetivos abarcados.

4.1. DISEÑO Y CARTOGRAFIADO DE ESCENARIOS DISRUPTIVOS

RESUMEN

A pesar de que la tarea de cartografiar escenarios futuros es considerada una herramienta de apoyo para la planificación territorial, su integración en la toma de decisiones continúa siendo un reto. Este trabajo pretende avanzar en dicha tarea, ofreciendo un instrumento de representación, interacción y dialogo entre agentes implicados, que facilite la gestión de los espacios urbanos. Este trabajo parte de tres visiones futuras, tomando como caso de estudio la región este del Área Metropolitana de Madrid (España). La tarea consistió en la realización de un taller participativo, implicando a una serie de expertos en materia de planificación urbana y transporte, que cartografiaron las transformaciones de los usos del suelo para cada escenario. Los resultados obtenidos mostraron contrastes entre los diferentes escenarios, destacando la utilidad de las visiones y del taller participativo en la representación espacial de la cantidad y dirección del crecimiento de los usos urbanos y la organización de la red de transporte.

PALABRAS CLAVE

Cartografía; planificación de escenarios; taller de cartografiado colaborativo, usos del suelo urbano, disruptivo.

Molinero-Parejo, R., Aguilera-Benavente, F., Gómez-Delgado, M., & Soria-Lara, J. A. (2021). *Mapping disruptive long-term scenarios using a participatory approach*. *Journal of Maps*, 17 (1), 106–115. <https://doi.org/10.1080/17445647.2021.1937726>



Revista	Journal of Maps
Editorial	TAYLOR & FRANCIS LTD
Tipo	Open Access
Categorías relacionadas	Geografía
Cuartil JIF (2021)	Q2
Factor de impacto (5 años)	2,577

MAPPING DISRUPTIVE LONG-TERM SCENARIOS USING A PARTICIPATORY APPROACH

1. INTRODUCTION

Urbanisation is the most dramatic form of land transformation (Li et al., 2018), a phenomenon that has witnessed a spiralling increase in recent decades (Bettencourt & West, 2010; Ustaoglu et al., 2017). It is estimated that 68.4% of the world's population will live in urban areas by 2050 (World Urbanization Prospects, 2018), duplicating urban areas in developed countries and tripling it in developing countries (UN-Habitat, 2018). This rapid urbanisation, often unplanned, brings major social impacts and environmental degradation (Chen, 2007; Zhou & Wang, 2011). Moreover, the distribution of urban land uses conditions significantly the transport system (Wegener & Fuerst, 2004). In order to properly manage urban areas, more strategic future planning approaches are needed (e.g., visioning, scenario planning, project design, simulation models).

The strong two-way relationship between urban land use and transport (Wegener, 2004) has prompted a growing interest in strategic future planning instruments that effectively integrate both aspects (Brömmelstroet & Bertolini, 2010; Miller, 2018). The scenario planning is a case in point (Börjesson, Höjer, Dreborg, Ekvall & Finnveden, 2006), which refers to a series of social science methods aimed at depicting possible disruptive future scenarios with respect to business-as-usual (BAU) (van der Heijden, 2000). Disruptions refer to low probability process and events with high impacts in population lifestyles. Such disruptions can be positive and negative effects for society, but in all cases alter linearity and business-as-usual trends. Thus, enabling planners to anticipate and manage a wide number of future options during decision-making processes. In other words, planners and stakeholders would be able to formulate policy options for unexpected future scenarios, designing appropriate strategies to enhance or correct the resulting scenarios effects (Akerman & Höjer, 2006; Banister et al., 2000; Lyons & Davidson, 2016).

To imagine different future situations with respect to BAU, it is important to include divergent elements in the design in order to generate more disruptive scenarios (Soria-Lara & Banister, 2018), identified through participatory processes (Junghans, Kreft & Welp, 2018). This can facilitate outside-the-box thinking, enriching the visioning process and giving rise to more disruptive scenarios (Saritas & Smith, 2011).

However, conventional research outcomes from the abovementioned scenario planning process in urban land use and transport planning are mainly descriptions or explanations (e.g., narratives) of possible future trends, focused on understanding the potential impacts of strategic futures on cities and their transport systems. Therefore, new thinking is required to engage decision-makers, planners, businesses and people in formulating practical and implementable policy options based on long-term scenarios, especially when these are highly disruptive. Consequently, this process must be combined with new collaborative mapping techniques (Caquard & Cartwright, 2014) in order to foster interactive working environments to support urban policy-making and to establish meeting-point where stakeholders involved in planning can discuss to find win-win solutions (Arranz-López et al., 2017). Thus, scenario planning requires the involvement of people with a sufficiently expert knowledge of urban systems (urban planners, transport engineers, environmental consultants, and property developers) to be able to identify characteristics of the scenarios and provide a more accurate spatial representation (Larondelle, Frantzeskaki & Haase, 2016). Furthermore, it is required to design activities that facilitate radical transformation of urban areas. Most previous studies have addressed this aspect using traditional drawing and mapping

techniques (Goodier & Soetanto, 2013; Schoemaker, 1995), and have not included a comprehensive spatialisation process.

To address the abovementioned issues, the aim of the present study focuses on generating maps of disruptive future scenarios related to changes in urban land use and mobility patterns, enabling different types of stakeholders to tackle the planning world through effective and creative spatial ideas. For this purpose, we conducted a participatory mapping workshop to spatialise the characteristics of three disruptive 2050 scenarios, using a sector of the metropolitan area of Madrid (the Henares Corridor, Spain) as case study. A total of 18 experts were involved in the experiential workshop, covering professional fields (urban planning, transport, environment, mobility, public health, etc.). Their experience and capacity to analyse and assess, together with the design of the workshop exercises and activities, enabled them to represent urban land use changes in the Corridor of Henares for three different scenarios.

This article is organised as follows: (1) introduction; (2) case study characteristics; (3) design and mapping disruptive future scenarios (processing baseline data to create a base map, implementation of a participatory mapping workshop and scenario construction); and (4) final conclusions.

2. CASE STUDY AND FUTURE VISIONS

The case study comprised a sector of the Henares Corridor (Figure 1), an urban-industrial place located in the metropolitan area of Madrid, with a population of 417,773 inhabitants (National Statistics Institute, 2018). The corridor is organised along major transport infrastructures and serves as a connection route between the two most important metropolitan areas in Spain: Madrid and Barcelona. This circumstance has led to remarkable urban and industrial growth which was especially marked in the late 20th century (Rodríguez-Espinosa et al., 2020). Over the last 30 years, the area has witnessed an annual urban growth rate of 3.4%, with a higher rate in single-family homes (4.21%) than in industrial land use (2.92%) due to productive restructuring and stagnation in the secondary sector.

Considering the context described above and as a pre-research stage (Soria-Lara et al., 2021), we conducted a visioning process that resulted in the generation of three future visions for a 2050 horizon (Ariza-Álvarez et al., 2021). These visions contributed to generating exploratory scenarios, which allowed to anticipate and examine different assumptions over a long-term future, supporting strategic decision-making in the case study. To this aim, we employed a participatory process that involved conducting semi-structured interviews with 129 residents and commuters, exploring aspects related to transport and urban land uses of the case study. Below, we summarise the three visions that would disrupt BAU projections, used to stimulate an alternative thinking and interrupt the linearity of the process, increasing options to explore imaginable or unimaginable futures (Soria-Lara et al., 2021):

Non-motorized city centres (1). The 2050 vision is fundamentally based on the full restriction of private vehicles access to city centres. All public space in city centres is recovered for active mobility and for the creation of socialization spaces. This shift would initiate a change in the modal split, increasing walking and cycling levels to all daily destinations. There would be a preference for cities offering a high mix of residential, shopping, leisure, and working places, reduce the distances between those activities and foster active mobility patterns. As a result, working places (currently located in the city's periphery) would be transformed into more mixed-use areas. A dense network of green corridors will connect different places of the case study, including the city centre and the periphery. Public transport stations would be located in the periphery and tightly integrated with green corridors facilitating multimodality.

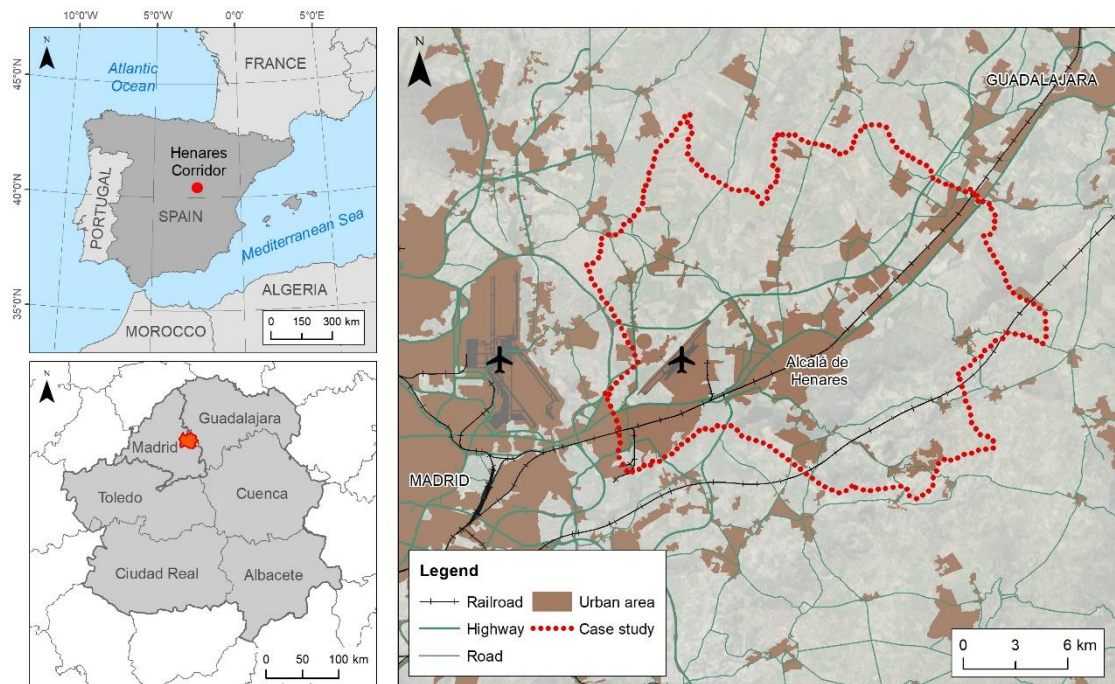


Figure 1. Case study.

Overpopulation (2). Under conditions of drastic overpopulation, the vision of 2050 would show changes in modal split patterns. This would increase use of collective modes for work commuting and increased walking and cycling rates to shopping and leisure locations. Car ownership rates would decrease in favour of a generalization of car-sharing habits. There would be a preference from high-income families to live in the city periphery and in low density places, but with a high mix land use. Consequently, current work areas (located in the city's periphery) would be transformed into more multifunctional areas. On the other hand, low-income families would prefer to live in high-density areas in city centres. A dense green network of corridors would connect different places along the case study, with strong integration with public transport stations fostering multimodality.

High level of insecurity in urban areas (3). The 2050 vision is strongly affected by a high level of insecurity in urban areas as a consequence of increasing social inequalities. Walking and cycling are not advisable in this context. Under these conditions, the modal split would be drastically altered, with the private car dominating all daily trips. Nevertheless, there would be also preferences for increasing the level of car sharing. Public green areas would be removed and recovered for car infrastructures. There would be a preference by high-income families for living in the city periphery in private communities. In this respect, urban land uses would be highly segregated in homogenous areas connected by motorized infrastructure. City centres would be mainly transformed into work destinations, with most employees commuting from the city's periphery. Low-income families would also tend to live in those insecure city centres.

3. MAPPING DISRUPTIVE FUTURE SCENARIOS

Figure 2 shows a diagram of the stages employed in processing the baseline visions and subsequent mapping through scenario planning: 1) processing of cadastral information to construct a base map (2018) to use during the experiential workshop; 2) implementation of participatory mapping workshop with experts to map changes in urban land use and transport

associated with each of the three scenarios; and 3) incorporation of the workshop results in a Geographic Information System (GIS) to obtain final maps of the future scenarios (2050).

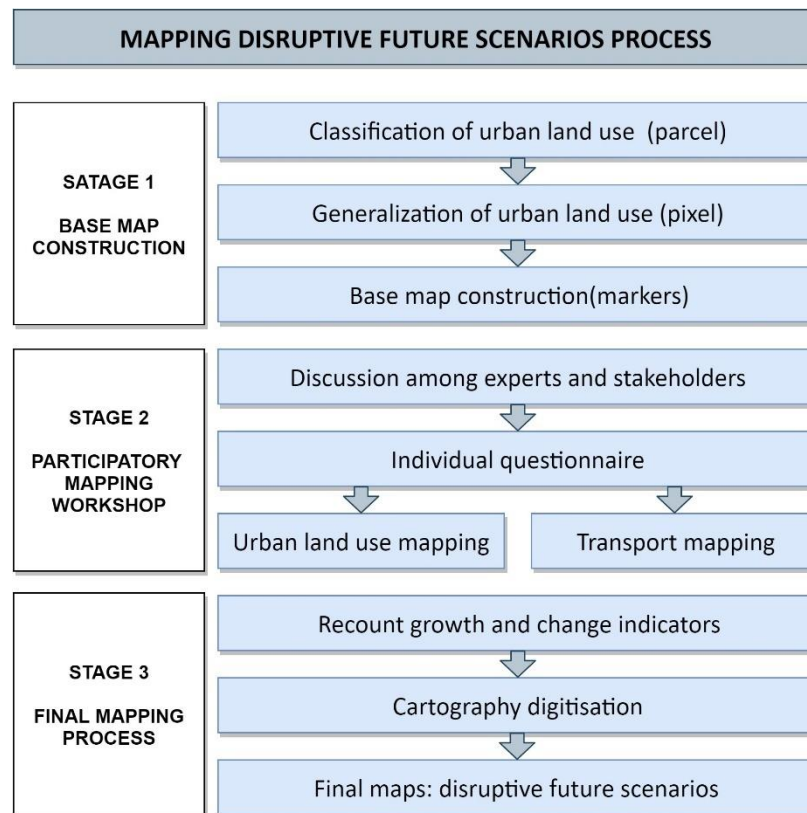


Figure 2. Flowchart of mapping disruptive future scenarios process.

3.1. BASE MAP CONSTRUCTION: PARCEL, PIXEL AND MARKERS

In order to develop more refined techniques of facilitation and support for planning groups, we decided to generate a map that was used as a basis for interaction between experts of the abovementioned workshop. Given the characteristics of the scenarios, the map needed to include the different densities and types of building together with the existence of residential, industrial, commercial and utilities or mixed uses. Therefore, we used cadastral information from the Cadastre of Spain (<https://www.sedecatastro.gob.es/>) to represent urban land uses. This choice was made on two basic considerations as follow.

First, the information on each cadastral parcel includes building type (e.g., multi-family dwellings, single-family dwellings, mixed use buildings, commercial building, markets, religious buildings, warehouses, etc.), rendering it possible to determine the degree of mixed uses in each parcel and therefore the existence of mixed, residential or industrial uses. Second, the information also includes the number of buildings in each parcel, rendering it possible to distinguish those with a higher density of residential use (multi-family dwellings) from those with lower densities (single-family dwellings). However, in order to obtain these data, it was necessary to pre-process the information, determining the degree to which each type of building predominated in each parcel and assigning each cadastral parcel the urban land use indicated in Figure 3.

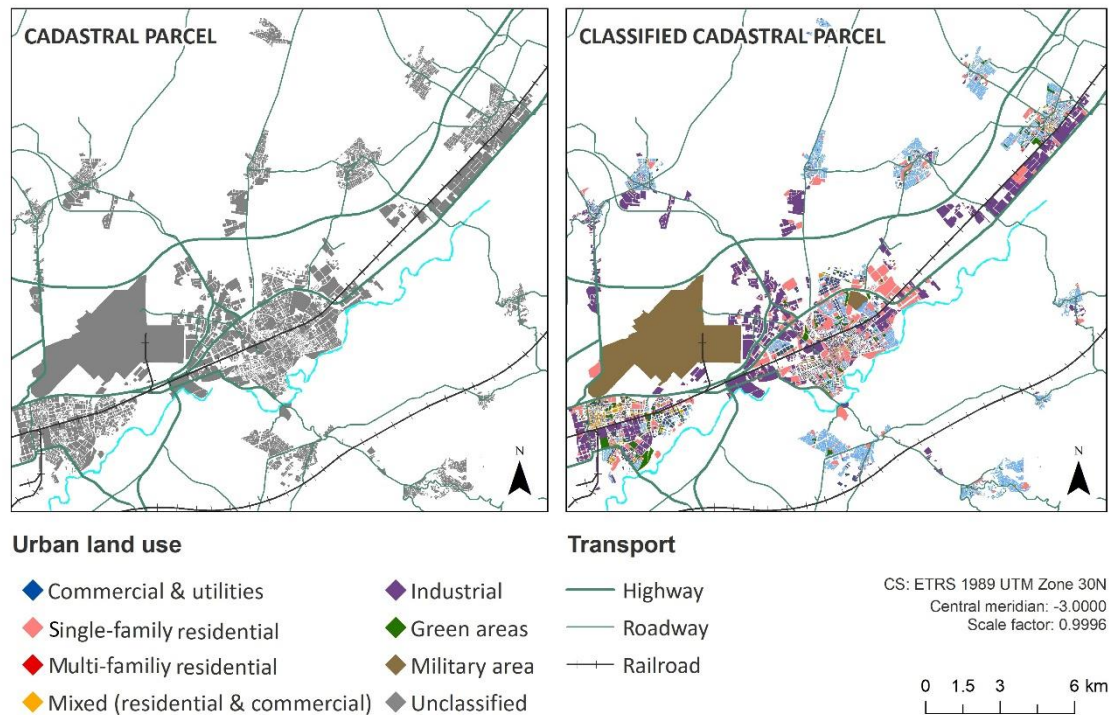


Figure 3. Basic cadastral information (left) and classification by urban land use (right).

Due to the complexity of mapping disruptive future scenarios, which in some cases might entail major changes in urban land uses, we ruled out manual mapping of future urban land use distribution. Earlier pilot experiments had indicated that this approach only yielded representations of new urban growth, but not modifications to or loss of pre-existing uses. To solve this, we devised a system of representing urban land uses using different coloured markers (Figure 4) for each current urban land use. These could be easily moved by workshop experts to represent urban land use changes, new growth, etc.

To show uses with these markers, we designed a vector grid with cells representing a real area of 250 x 250 m, a sufficiently large size to accommodate a marker on the map. Each grid element was assigned the most representative urban land use in each cell according to the total number of parcels per pixel for each category and placing the marker corresponding to each category (Figure 5).



Figure 4. Photographs of the dynamic system of changing urban land uses by using markers.

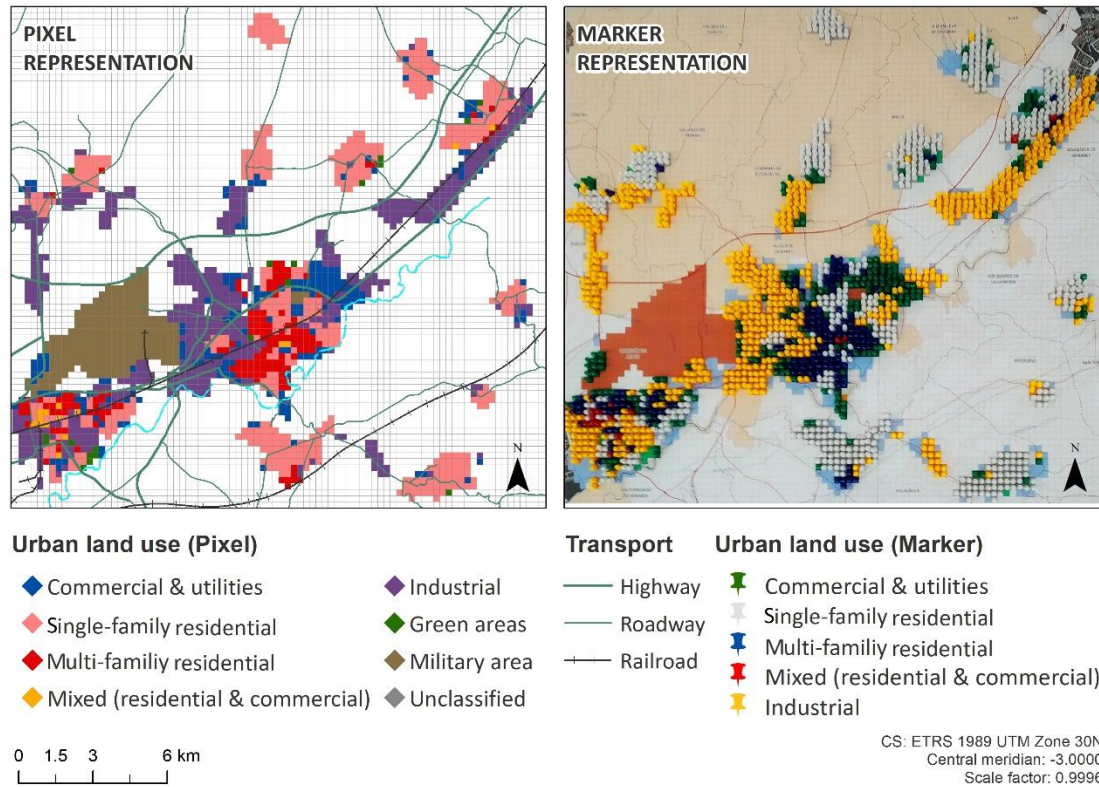


Figure 5. Urban land uses representation by pixels (left) and markers (right).

3.2. PARTICIPATORY MAPPING WORKSHOP

The participatory mapping workshop was attended by 18 experts in urban planning and transport. To encourage experts' interaction and a diversity of perspectives (Junghans et al., 2018), three groups were established (one per scenario) with six experts, ensuring the right variability between professional domains. This variety of perspectives attempts to offer a more complex dialogue, encompassing all potential factors involved in the evolution of urban areas. Considering the existing profiles, each group was organised with at least one expert from each field of interest (urban planners, transport planners, environmental consultants, and property developers). Figure 6 shows a group of experts mapping one of the three scenarios during the workshop.



Figure 6. Photograph taken during the participatory mapping workshop: sharing and discussion among the experts and stakeholders.

During the first part of the workshop, we administered a questionnaire to define the spatial characteristics of each scenario. Participants openly discussed potential answers, according to their area of expertise. After discussion, each expert individually filled out the following issues in the questionnaire:

- a) amount of growth/decline in each urban land use, which ultimately determines the number of markers to be added or removed from the map;
- b) most relevant transport mode, determining the collective draw of infrastructures;
- c) existence of green areas, which would indicate whether new green spaces or corridors will be designed;
- d) level of land uses mix, which would indicate whether the markers are placed next to the same or different colours (urban land use);
- e) urban sprawl level, which would signal whether the added markers (urban growth) are placed scattered or compact.

Table 1 shows the results for scenario characterisation based on the information obtained from the questionnaires where they scored on a 5-point Likert scale.

The second part of the workshop consisted of two activities conducted in parallel: urban land uses reconfiguration and infrastructures/corridor design. The first was deployment of the markers to represent urban land uses. According to the amount of change in each use determined in the first part, each group was told how many markers to add to the map (growth) or subtract from it (loss). Similarly, according to the degree of dispersion and mixed uses identified in the first part, experts were told to modify urban land use distribution by moving the markers to better represent the future scenario.

Table 1. Characteristics of the future scenarios as a result of the first part of the workshop.

Scenario	Urban land use	Gr*	Transport	Green areas	Mix uses	Urban sprawl
1	Multi-family residential	+				
	Mixed	+	Suitable mobility	High public presence	Mix	Low
	Single-family residential	-	(on foot, by bike)			
	Industrial	=				
	Commerce and services	++				
<hr/>						
2	Multi-family residential	+				
	Mixed	+	Suitable mobility	High public presence	Mix	Medium
	Single-family residential	++	(car sharing)			
	Industrial	=				
	Commerce and services	++				
<hr/>						
3	Multi-family residential	=				
	Mixed	-		Private presence only	Segregation	High
	Single-family residential	+++	Private car			
	Industrial	-				
	Commerce and services	=				
<hr/>						

(-) Loss (- 25% of tendency**)

(=) Stability (unchanged)

(+) Small growth (+25% of tendency **)

(++) Moderate growth (+50% of tendency **)

(+++) High growth (+75% of tendency **)

*Gr: Growth rate

** Past trend period (1988 – 2018)

The second activity consisted of drawing the transport network and green infrastructures, as being the easiest and most effective technique to indicate the location of new roads, green corridors and train/bus stations, etc. As a result of both activities, we obtained three maps showing the urban land use distribution in each scenario and changes in the transport network and green infrastructures in the case study (Figure 7).

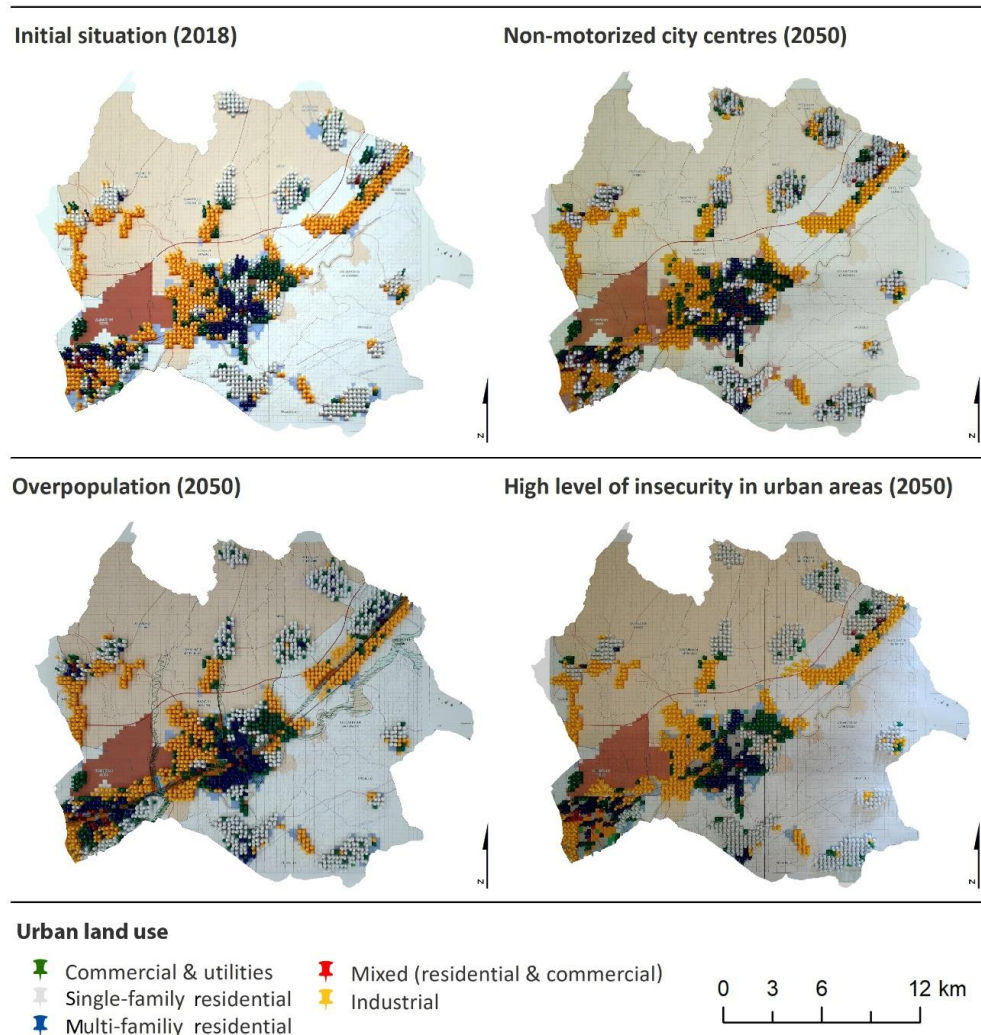


Figure 7. Outcomes of the participatory mapping workshop.

3.3. MAPPING DISRUPTIVE FUTURE SCENARIOS OF URBAN LAND USE AND TRANSPORT

The maps generated in the workshop were digitised by reversing the pixel to parcel conversion process (similar to that described in section 3.1) and incorporating the information into GIS software. This yielded a more detailed representation of each scenario by parcel.

Broadly speaking, industrial areas are generally located close to existing ones, with no expected growth. In the high level of insecurity in urban areas scenario, clustering patterns of urban land use are observed, especially in single-family residential and commercial pre-existing areas, while in the overpopulation scenario the mix of residential and commercial built-up areas is more pronounced. Below, we describe in detail the results of the three scenarios:

In the *Non-motorized city centres* scenario, experts indicated that services and utilities infrastructures would experience significant growth (229.68 ha), while the industrial sector would remain stable. The case study would be structured around a network of green spaces linking the urban centres, without any significant changes to the road network. There would be an increase in mixed land uses, with more mixed building (6.65 ha) and multi-family residential (70.70 ha) and a slight loss of single-family residential compared with earlier trends.

In the case of the *Overpopulation* scenario, the hub of the metropolitan corridor would be transformed into a network of interconnected green spaces, with high growth in single-family residential (730.43 ha) on the periphery coupled with growth in commerce and utilities (359.80 ha). To a lesser extent, there would be an increase in multi-family residential (221.75 ha) to accommodate the significant population intensification, and in mixed building (63.24 ha). As regards transport, new high occupancy routes would be designed with intermodal hubs (train and bus stations), and some stops in intermodal stations would change.

Lastly, in the *High level of insecurity in urban areas* scenario, high levels of citizen insecurity would lead to the disappearance of green spaces and a slight loss of industrial land use. As a consequence of significant growth in single-family residential (789.38 ha) on the periphery and higher segregation of uses, there would be an increase in the use of private vehicles. At the same time, a deterioration in public transport would occur. The transport network would undergo considerable remodelling, with new roads to meet the requirements of residents on the periphery and greater use of private vehicles.

4. CONCLUSIONS

The present study meets the challenge of spatially representing 2050 disruptive future scenarios generated through a scenario planning process. To this end, we used a participatory mapping workshop with planners and other experts working in the fields of transport and city environments (transport engineers, environmental consultants, property developers, etc.), considering different points of view. The results showed that the workshop activities had generated detailed maps of three disruptive future scenarios, thus furthering integration of the tasks entailed in the management of urban areas. The maps were generated in an intuitive and user-friendly language for urban planning, suitable for professional domains and researchers from several fields. This would enable the exchange of ideas to enhance urban management policies, in contrast to the exclusive use of narratives, which are more abstract and difficult to understand for some of the potential stakeholders involved.

We employed the participatory mapping workshop rather than other Public Participation Geographic Information Systems (PPGIS) techniques such as representation using web mapping applications (Rzeszewski & Kotus, 2019), thus allowing simultaneous dialogue between experts and face-to-face communication as interact with urban land uses maps.

Within PPGIS context, all phases are considered important in urban planning (Brown, 2015), from local people's involvement in the elaboration of narratives, to expert collaboration in the urban land uses and transport mapping. In addition, a validation of future disruptive scenarios will be carried out by the same experts in a GIS environment, considering future simulations. In that light, the proposed methodology could improve PPGIS application for facing urban planning by making existing tools more efficient, instead of looking for new management tools (Kahila-Tani, 2015).

The resulting maps captured possible outside-the-box future scenarios for use as a final product in scenario-based decision-making (Brail, 2008). Similarly, they rendered it possible to analyse

aspects such as segregated vs mixed uses, urban sprawl, modes of transport, etc., and provided a more-effective method for the design of sustainable policy packages tailored to each scenario (Soria-Lara & Banister, 2018). Furthermore, these methods might be useful as an adjunct to simulation models (Guan et al., 2011), as they could be used to test model calibration when simulating these scenarios. In any of these cases, they would also contribute to planning anticipatory measures (Anderson, 2010). Nevertheless, further research is required in relation to application of this method at different scales or using 3D, where the models can reproduce simulation results as close to the real-life as possible.

SOFTWARE

The maps presented were drafted with ArcMap 10.6. The final maps were created with ArcMap 10.6 and Adobe Illustrator CS4. The horizontal urban profiles were built with AutoCAD 2020.

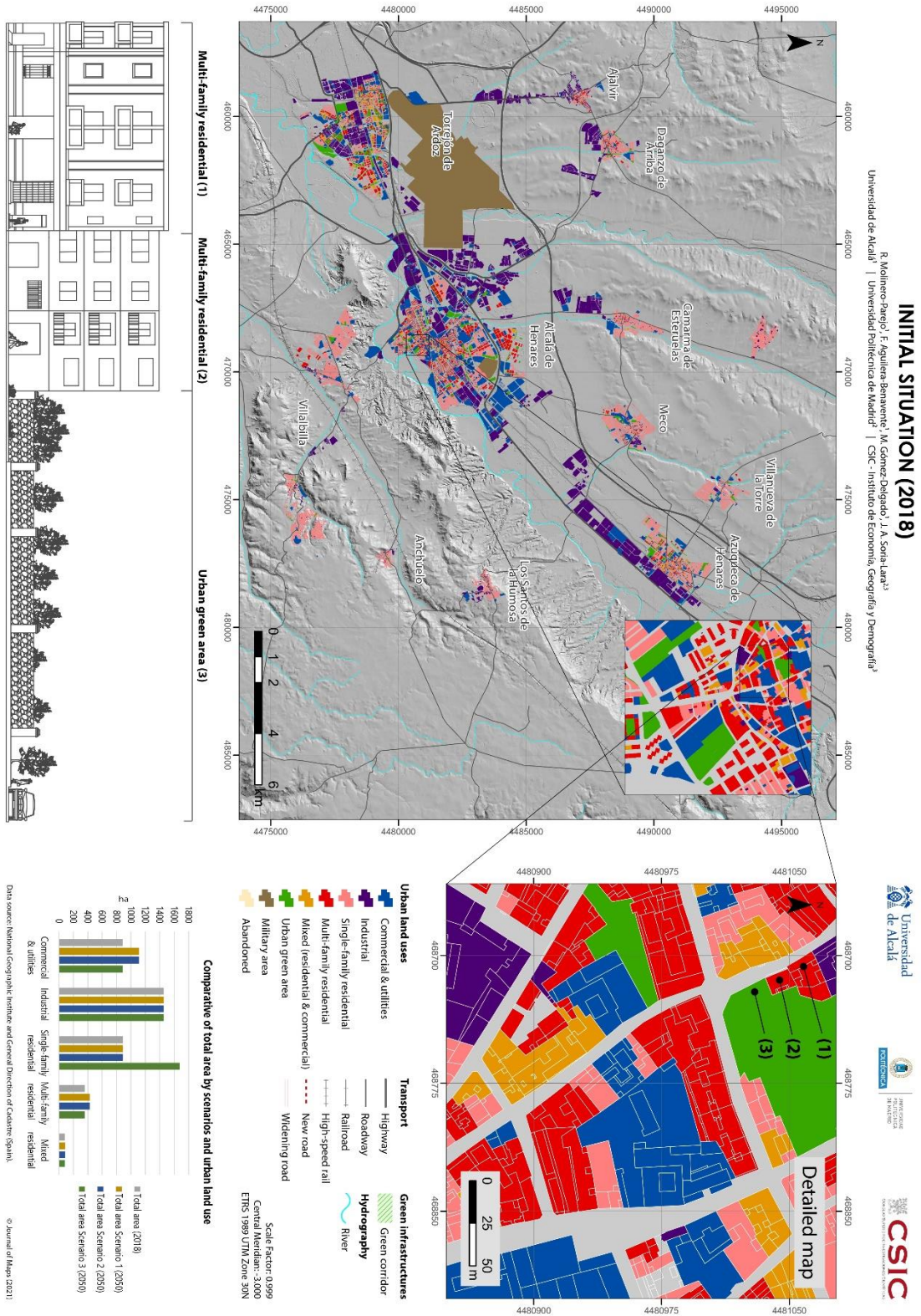
REFERENCES

- Akerman, J., & Höjer, M. (2006). How much transport can the climate stand? – Sweden on a sustainable path in 2050. *Energy Policy*, 34(14), 1944–1957. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.02.009>
- Anderson, B. (2010). Preemption, precaution, preparedness: Anticipatory action and future geographies. *Progress in Human Geography*, 34(6), 777–798. <https://doi.org/10.1177/0309132510362600>
- Ariza-Álvarez, A., Soria-Lara, J. A., Arce-Ruiz, R. M., López-Lambas, M. E., & Jimenez-Espada, M. (2021). Experimenting with scenario-building narratives to integrate land use and transport. *Transport Policy*, 101, 57–70. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.11.012>
- Arranz-López, A., Soria-Lara, J. A., López-Escolano, C., & Pueyo Campos, Á. (2017). Making ‘Retail Mobility Environments’ visible for collaborative transport planning. *Journal of Maps*, 13(1), 90–100. <https://doi.org/10.1080/17445647.2017.1383945>
- Banister, D., Dreborg, K., Hedberg, L., Hunhammar, S., Steen, P., & Åkerman, J. (2000). Transport policy scenarios for the EU: 2020 images of the future. *Innovation*, 13(1), 27–45. <https://doi.org/10.1080/135116100111649>
- Bettencourt, L., & West, G. (2010). A unified theory of urban living. *Nature*, 467(7318), 912–913. <https://doi.org/10.1038/467912a>
- Börjeson, L., Höjer, M., Dreborg, K. H., Ekvall, T., & Finnveden, G. (2006). Scenario types and techniques: Towards a user’s guide. *Futures*, 38(7), 723–739. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2005.12.002>
- Brail, R. K. (2008). *Planning Support Systems for Cities and Regions*. In R. K. Brail (Ed.), Lincoln Institute of Land Policy. Lincoln Institute of Land Policy. http://link.springer.com/10.1007/978-0-387-35973-1_990
- Brömmelstroet, M. Te, & Bertolini, L. (2010). Integrating land use and transport knowledge in strategy-making. *Transportation*, 37(1), 85–104. <https://doi.org/10.1007/s11116-009-9221-0>

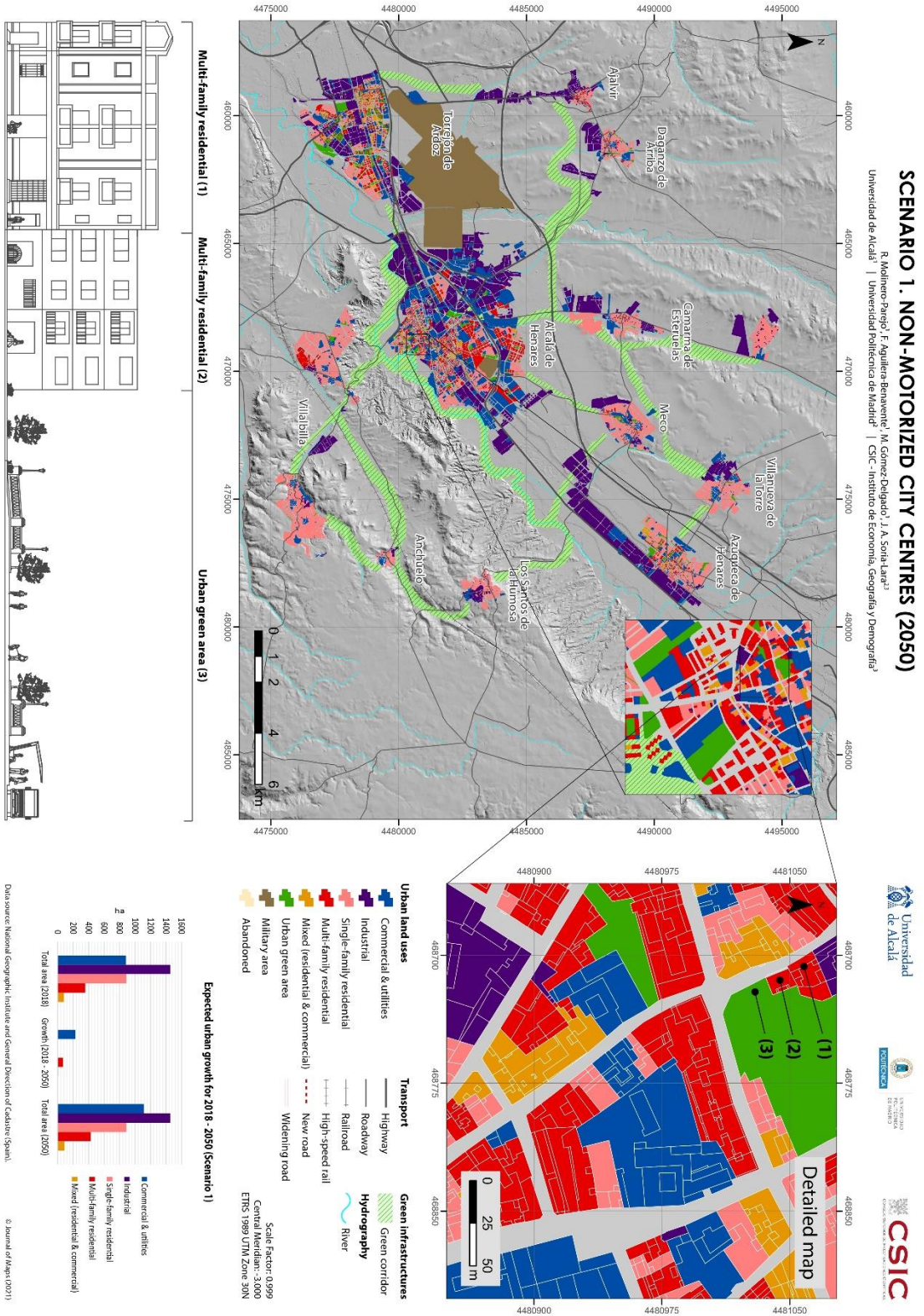
- Brown, G. (2015). Engaging the wisdom of crowds and public judgement for land use planning using public participation geographic information systems. *Australian Planner*, 52(3), 199–209. <https://doi.org/10.1080/07293682.2015.1034147>
- Caquard, S., & Cartwright, W. (2014). Narrative cartography: From mapping stories to the narrative of maps and mapping. *Cartographic Journal*, 51(2), 101–106. <https://doi.org/10.1179/0008704114Z.000000000130>
- Chen, J. (2007). Rapid urbanization in China: A real challenge to soil protection and food security. *CATENA*, 69(1), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.04.019>
- Goodier, C. I., & Soetanto, R. (2013). Building future scenarios using cognitive mapping. *Journal of Maps*, 9(2), 203–217. <https://doi.org/10.1080/17445647.2013.770997>
- Guan, D., Li, H., Inohae, T., Su, W., Nagaie, T., & Hokao, K. (2011). Modeling urban land use change by the integration of cellular automaton and Markov model. *Ecological Modelling*, 222(20–22), 3761–3772. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.09.009>
- Junghans, L., Kreft, S., & Welp, M. (2018). Inclusive Visions for Urban Transitions: Lessons from stakeholder dialogues in Asian medium sized cities. *Sustainable Cities and Society*, 42(February 2017), 512–520. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.003>
- Kahila-Tani, M. (2015). Reshaping the planning process using local experiences: Utilising PPGIS in participatory urban planning. <http://urn.fi/URN:ISBN:000-000-00-00>
- National Statistics Institute (2018). Spanish Statistical Office. Retrieved from <https://www.ine.es/>
- Larondelle, N., Frantzeskaki, N., & Haase, D. (2016). Mapping transition potential with stakeholder- and policy-driven scenarios in Rotterdam City. *Ecological Indicators*, 70, 630–643. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.028>
- Li, C., Li, J., & Wu, J. (2018). What drives urban growth in China? A multi-scale comparative analysis. *Applied Geography*, 98(June), 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.07.002>
- Lyons, G., & Davidson, C. (2016). Guidance for transport planning and policymaking in the face of an uncertain future. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 88, 104–116. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.03.012>
- Miller, E. J. (2018). The case for microsimulation frameworks for integrated urban models. *Journal of Transport and Land Use*, 11(1), 1025–1037. <https://doi.org/10.5198/jtlu.2018.1257>
- Rodríguez-Espinosa, V. M., Aguilera-Benavente, F., & Gómez-Delgado, M. (2020). Green infrastructure design using GIS and spatial analysis: a proposal for the Henares Corridor (Madrid-Guadalajara, Spain). *Landscape Research*, 45(1), 26–43. <https://doi.org/10.1080/01426397.2019.1569221>
- Rzeszewski, M., & Kotus, J. (2019). Usability and usefulness of internet mapping platforms in participatory spatial planning. *Applied Geography*, 103, 56–69. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2019.01.001>
- Saritas, O., & Smith, J. E. (2011). The Big Picture – trends, drivers, wild cards, discontinuities and weak signals. *Futures*, 43(3), 292–312. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2010.11.007>

- Schoemaker, P. J. H. (1995). Scenario Planning: A Tool for Strategic Thinking. *MIT Sloan Management Review*, 36, 25–40.
- Soria-Lara, J. A., Ariza-Álvarez, A., Aguilera-Benavente, F., Cascajo, R., Arce-Ruiz, R. M., López, C., & Gómez-Delgado, M. (2021). Participatory visioning for building disruptive future scenarios for transport and land use planning. *Journal of Transport Geography*, 90. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102907>
- Soria-Lara, J. A., & Banister, D. (2018). Collaborative backcasting for transport policy scenario building. *Futures*, 95, 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2017.09.003>
- UN-Habitat (2018). Human Settlements Programme. United Nations. Retrieved from <https://unhabitat.org/>
- Ustaoglu, E., Williams, B., & Petrov, L. O. (2017). Scenario analysis of alternative land development patterns for the Leipzig-Halle region: Implications for transport-land-use sustainability. *Urban Planning*, 2(1), 108–129. <https://doi.org/10.17645/up.v2i1.838>
- van der Heijden, K. (2000). Scenarios and Forecasting. *Technological Forecasting and Social Change*, 65(1), 31–36. [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(99\)00121-3](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(99)00121-3)
- Wegener, M. (2004). Overview of Land Use Transport Models. In D. A. Hensher, K. J. Button, K. E. Haynes, & P. R. Stopher (Eds.), *Handbook of Transport Geography and Spatial Systems* (Emerald, pp. 127–146). Emerald Group Publishing Limited. <https://doi.org/10.1108/9781615832538-010>
- Wegener, M., & Fuerst, F. (2004). Land-Use Transport Interaction: State of the Art. *SSRN Electronic Journal*, November, 1–119. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1434678>
- World Urbanization Prospects (2018). Department of Economic and Social Affairs. United Nations. Retrieved from <https://population.un.org/wup/>
- Zhou, X., & Wang, Y.-C. (2011). Spatial–temporal dynamics of urban green space in response to rapid urbanization and greening policies. *Landscape and Urban Planning*, 100(3), 268–277. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.12.013>

MAIN MAP (I). INITIAL SITUATION (2018)

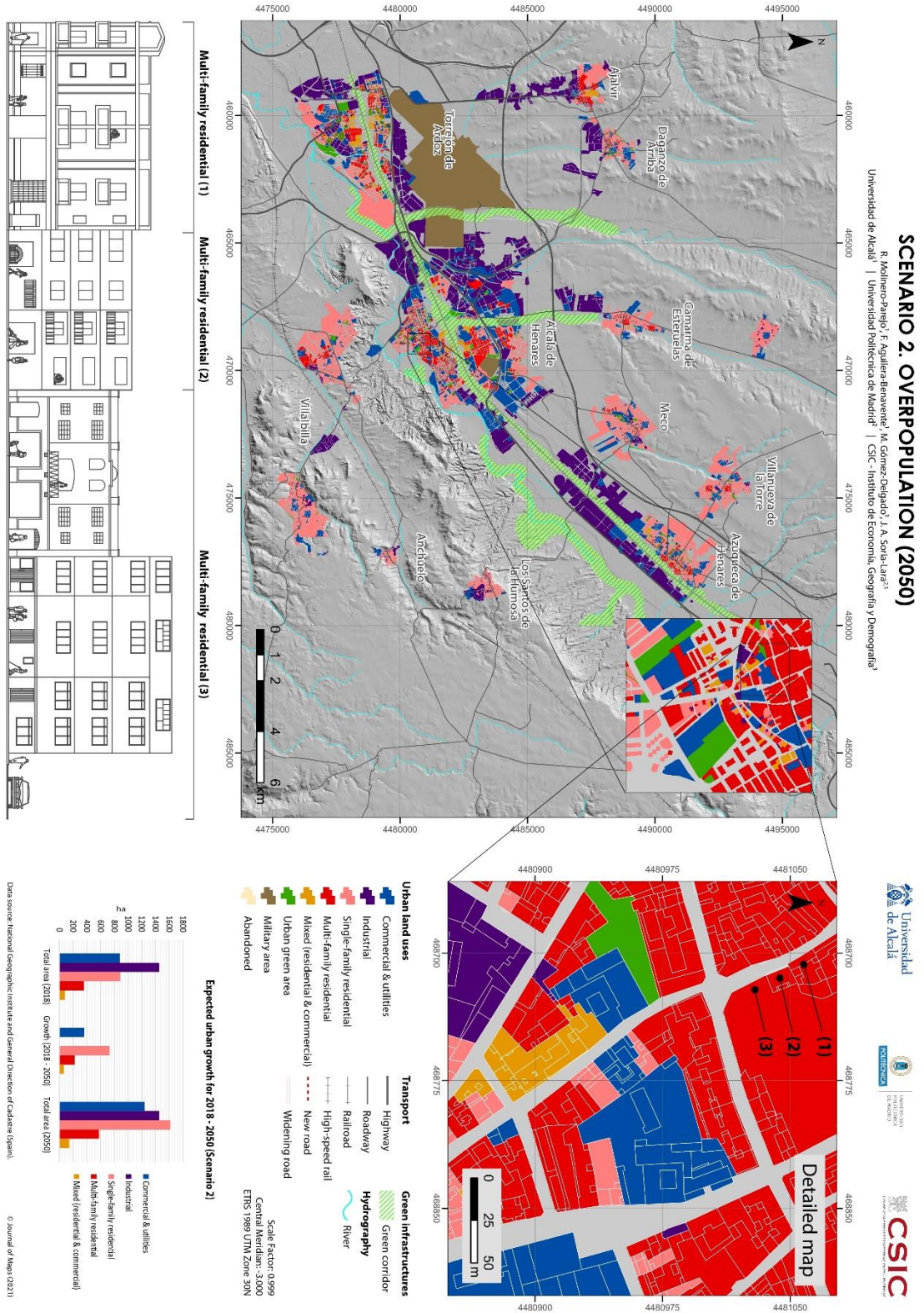


MAIN MAP (II). SCENARIO NON-MOTORIZED CITY CENTRES (2050)



Data source: National Geographic Institute and General Directorate of Cadastre (Spain).

MAIN MAP (III). SCENARIO 2. OVERPOPULATION (2050)



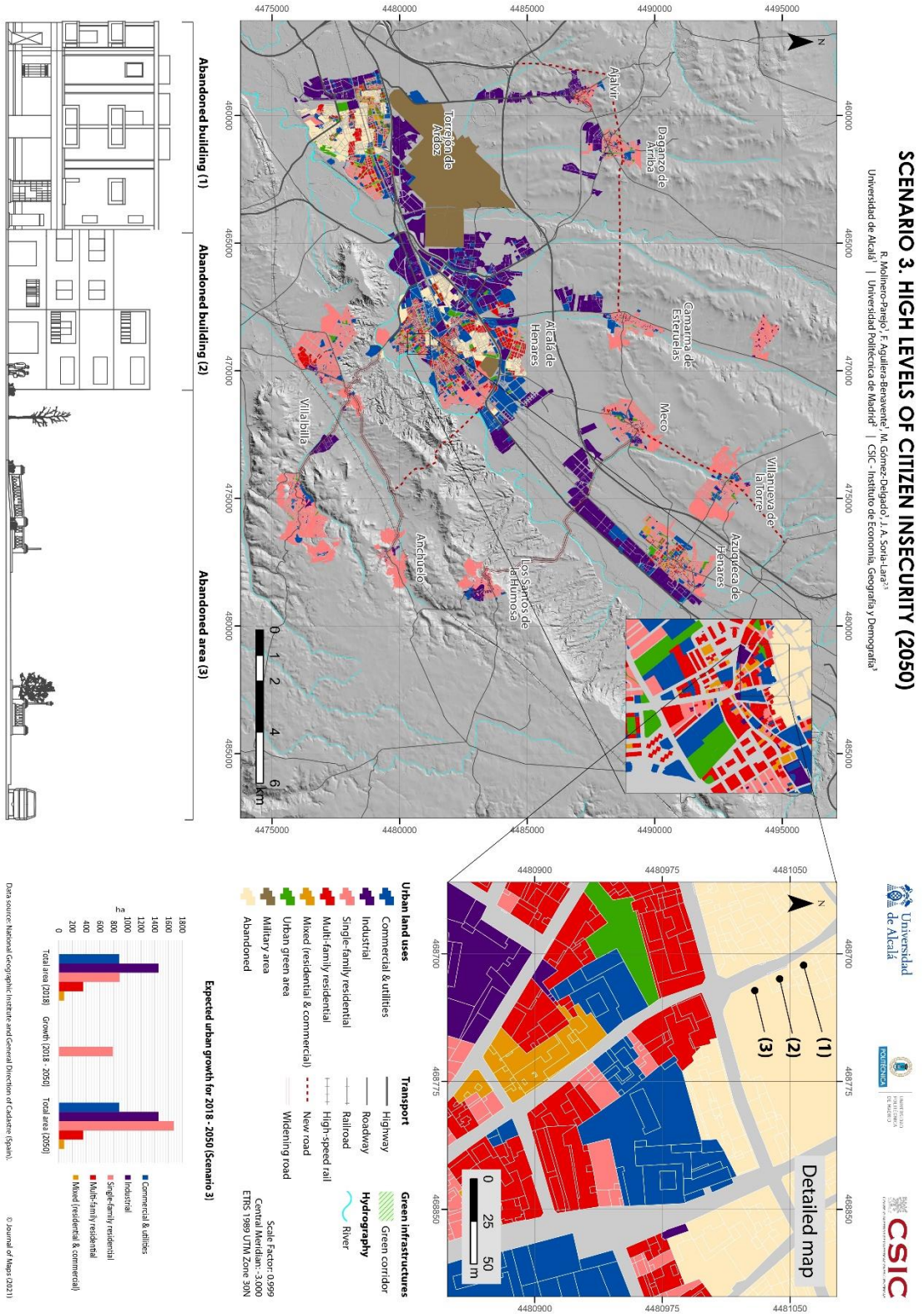
Legend

- Urban land uses:** Commercial & utilities (blue), Industrial (purple), Single-family residential (red), Multi-family residential (orange), Mixed (residential & commercial) (yellow), Urban green area (green), Military area (brown), Abandoned (grey).
- Transport:** Highway (thick grey line), Roadway (thin grey line), Railroad (dashed grey line), High-speed rail (dotted grey line), New road (dashed red line), Widening road (dashed blue line).
- Green infrastructures:** Green corridor (green line), Hydrography (blue wavy line), River (blue line).

Scale factor: 0,999
 Central Meridian: -3,000
 ETRS 1989 UTM Zone 30N

Data source: National Geographic Institute and General Director of Cadastre (Spain).
 © Journal of Maps (2021)

MAIN MAP (IV). SCENARIO 3. HIGH LEVELS OF INSECURITY IN URBAN AREAS (2050)



4.2. IDENTIFICACIÓN DE FACTORES EXPLICATIVOS DE CRECIMIENTO URBANO

RESUMEN

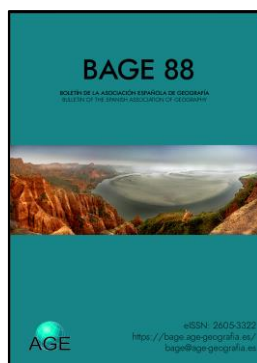
La expansión urbana es un proceso espaciotemporal que refleja los patrones de localización de la población y sus actividades, pudiendo provocar impactos irreversibles sobre el territorio. La construcción de narrativas y el posterior cartografiado de escenarios futuros se ha revelado como una estrategia de planificación que puede ayudar en la organización de los usos del suelo y el transporte. El Corredor del Henares (Madrid) se ha escogido como caso de estudio, representando la evolución espacial de cinco usos del suelo urbano en tres escenarios disruptivos para 2050.

El presente trabajo tiene como objetivo determinar qué factores explicativos influyeron en la distribución espacial de los cinco usos que se proyectaron en un previo taller de cartografía colaborativa. De esta forma, se pretende obtener información más precisa acerca de los factores explicativos del cambio de uso en cada escenario, que posteriormente pudiera ser aplicable a nuevos modelos espaciales de simulación urbana. Así, dado el carácter ubicuo de los procesos de urbanización, se empleó Regresión Logística Geográficamente Ponderada al permitir un análisis espacial de las relaciones entre los factores explicativos que los modelos globales no permiten estudiar. Los resultados obtenidos mostraron coincidencias entre los factores más significativos del modelo y las narrativas de los escenarios.

PALABRAS CLAVE

Escenarios; Regresión Logística Geográficamente Ponderada (RLGP); cartografía colaborativa; usos de suelo urbano; factores explicativos.

Molinero-Parejo, R., Aguilera-Benavente, F., & Gómez-Delgado, M. (2021). *Regresión Logística Geográficamente Ponderada para identificar los factores explicativos de la distribución de usos de suelo en escenarios futuros de crecimiento urbano*. Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles, 88. <https://doi.org/10.21138/bage.3052>



Revista	Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles
Editorial	Asociación Española de Geografía
Tipo	Open Access
Categorías relacionadas	Geografía
Cuartil JIF (2021)	Q3
Factor de impacto (5 años)	1,278

REGRESIÓN LOGÍSTICA GEOGRÁFICAMENTE PONDERADA PARA IDENTIFICAR LOS FACTORES EXPLICATIVOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE USOS DE SUELO EN ESCENARIOS FUTUROS DE CRECIMIENTO URBANO

1. INTRODUCCIÓN

Desde mediados del siglo XX, la población mundial que reside en áreas urbanas ha experimentado un crecimiento medio anual del 2,5 % aproximadamente, duplicando la población urbana en ese mismo periodo (United Nations, 2018). En consecuencia, las zonas urbanizadas del planeta se encuentran en continua expansión, presentando ritmos más acelerados en los países en vías de desarrollo (Hou, Wang, & Murayama, 2019). En el caso europeo, el rápido crecimiento de los espacios periurbanos de las áreas metropolitanas está generando crecimientos dispersos frente a un desarrollo histórico más compacto (Ustaoglu, Williams, & Petrov, 2017). Más concretamente, en España, este fenómeno ha provocado profundas transformaciones territoriales, traducidas principalmente en intensos procesos de suburbanización y fragmentación del espacio (Olazabal & Bellet, 2019; Pascual Rosa, Aguilera-Benavente, & Salado García, 2019). Todo ello ha supuesto impactos irreversibles sobre el territorio, afectando enormemente al conjunto de la sociedad en términos de gestión y acceso a recursos, contaminación, problemas de índole social y económica, etc. (Bharath, Chandan, Vinay, & Ramachandra, 2018; Chen, 2007).

En este contexto, el desarrollo de instrumentos de soporte a la toma de decisiones y la planificación urbana se ha visto impulsado en las últimas décadas. Así, el empleo de escenarios futuros en planificación (Börjeson, Höjer, Dreborg, Ekvall, & Finnveden, 2006), ha sido uno de los instrumentos que mejor se ha adaptado a la gestión de los usos del suelo, permitiendo conocer, desde diferentes enfoques, cómo afecta la evolución futura de los distintos usos a su distribución espacial (Gallardo Beltrán, 2014). Este instrumento de planificación ha ido adquiriendo especial protagonismo en la literatura científica, marcando un importante desarrollo en la línea del crecimiento urbano (Avin & Goodspeed, 2020; Chotchaiwong & Wjitkosum, 2019; Dadashpoor, Azizi, & Moghadasi, 2019; Perveen, Kamruzzaman, & Yigitcanlar, 2017; Ustaoglu et al., 2017). Gracias a estos escenarios es posible explorar diferentes alternativas de evolución de los sistemas urbanos, a la vez que permiten examinar los problemas de la expansión urbana en una línea temporal desde distintas perspectivas (Deal, Pan, Timm, & Pallathucheril, 2017). En este sentido, ofrecen la capacidad de deliberar sobre el futuro para revelar y comprender los principales problemas de la planificación, utilizando diferentes técnicas de representación espacial como el cartografiado, el dibujo, la realización de esquemas o la utilización de marcadores (Radinsky et al., 2017). Estas ventajas constituyen un sistema funcional de planificación futura que permite actuar sobre eventos más allá de la tendencia, es decir, ofrece cambios plausibles en la trayectoria territorial fuera de la idea de Business as usual (BAU) (van der Heijden, 2000). Tratar con diferentes futuros que escapan del pensamiento común prepara a los planificadores ante el surgimiento de eventos disruptivos e inesperados, identificando las debilidades y fortalezas que pudiesen tener frente a diversas situaciones venideras (Zapata & Kaza, 2015). A dichas ventajas se debe añadir la fácil adaptación y aplicación de los escenarios a distintas escalas y ámbitos territoriales, además de la complementariedad con un amplio abanico de instrumentos de planificación, lo que justifica la implementación de escenarios en la metodología del presente artículo.

Este enfoque de *scenario planning* es por el que apuesta el proyecto TRANSURBAN en el que se enmarca este trabajo. Para abordarlo, entre sus diferentes actividades, se organizó un taller de cartografía colaborativa donde participó un amplio conjunto de expertos adscritos al campo de la planificación urbana y el transporte, con la finalidad de cartografiar tres narrativas que representaban futuros disruptivos para el Corredor del Henares (Madrid). El resultado fue la

obtención de tres escenarios que mostraban la configuración espacial de distintas posibilidades de evolución del crecimiento urbano y de la red de transporte, aportando información acerca de la magnitud y ubicación de los cambios asociados a cada escenario (p. ej.: cantidad de crecimiento).

Además del valor que de por sí representan los escenarios obtenidos, es interesante explorar los factores espaciales que se encuentran relacionados con los cambios observados en cada escenario por diversas razones: a) por una parte, el estudio de dichos factores puede ayudar a constatar si las localizaciones de los crecimientos obtenidas en talleres colaborativos operan desde la lógica de los escenarios en los que se basan, es decir, permite reconocer y aceptar el criterio de los expertos mediante técnicas de estadística espacial; b) por otra parte, la identificación de dichos factores explicativos, puede ser de utilidad para el diseño y calibración de modelos de simulación urbana (Barreira-González, Aguilera-Benavente, & Gómez-Delgado, 2017; Jokar Arsanjani, Helbich, Kainz, & Darvishi Bolorani, 2013), especialmente en la configuración de reglas de transición para aquellos basados en Autómatas Celulares (AC), aportando un mayor realismo a estos (Barreira-González, Gómez-Delgado, & Aguilera-Benavente, 2015); y c) permiten la formulación de políticas y estrategias de planificación más sostenibles (Shafizadeh-Moghadam & Helbich, 2015), ya que pueden ayudar a identificar espacios que por su localización sean considerados atractivos para el desarrollo urbano y, a su vez, preservar de esta ocupación aquellos espacios de elevado valor ambiental.

En definitiva, los planificadores urbanísticos y los agentes con capacidad decisoria requieren información precisa y detallada enfocada a comprender los procesos de expansión urbana, que les permita asesorar adecuadamente la creación de planes orientados a la gestión de estos espacios (Jokar Arsanjani et al., 2013). Por consiguiente, el estudio de los factores que dirigen y condicionan el crecimiento urbano es fundamental para formular estrategias futuras de planeamiento sostenible (Jokar Arsanjani et al., 2013; Shafizadeh-Moghadam & Helbich, 2015). Dicho estudio es posible gracias al uso de técnicas enfocadas a evaluar y cuantificar la variabilidad de estos factores.

A la hora de entender las relaciones entre la amplia diversidad de factores, los modelos de regresión globales (Hu & Lo, 2007) no resultan los más idóneos debido a que no tienen en cuenta la componente espacial, pudiendo ocultar relaciones espaciales interesantes (Brunsdon, Fotheringham, & Charlton, 1996). Dichos autores demostraron que las estimaciones de los parámetros de regresión pueden variar en el espacio, afirmación a partir de la cual desarrollaron una familia de modelos matemáticos no estacionarios que se ajustasen a este. Ello ha permitido adecuar estos modelos de regresión a los datos geográficos, de tal manera que es posible evaluar y cuantificar los efectos de las variables observando variaciones espaciales (Gao & Li, 2011; Luo & Wei, 2009; Pineda Jaimés, Bosque Sendra, Gómez Delgado & Franco Plata, 2010).

Por ello, los modelos de Regresión Logística Geográficamente Ponderada (RLGP) han experimentado un importante auge en las últimas décadas, mostrando especial interés en el estudio de las relaciones espaciotemporales entre los factores del crecimiento urbano (Guanglong, Erqi, & Hongqi, 2017) o en su variabilidad espacial (Shafizadeh-Moghadam & Helbich, 2015).

Aunque han sido aplicados en diversos contextos espacialmente explícitos del transporte y la movilidad, como el cálculo de la demanda en las estaciones de metro (Gutierrez-Puebla, García-Palomares, & Daniel-Cardozo, 2012) o la exploración espacial de la variabilidad en el comportamiento y modos de viaje (Nkeki & Asikhia, 2019), el presente artículo los emplea para explorar y comprender el proceso de expansión urbana (Guanglong et al., 2017; Luo & Wei, 2009; Mondal, Das & Dolui, 2015; Shafizadeh-Moghadam & Helbich, 2015), haciendo especial hincapié en su aplicación para mejorar modelos de simulación del crecimiento urbano basados en

AC, y más concretamente, en la definición de las reglas de transición y la mejora de la precisión en las simulaciones (Mirbagheri & Alimohammadi, 2017).

Así, la presente investigación tiene como objetivo determinar qué factores explicativos del crecimiento urbano influyeron en la distribución espacial de los usos del suelo para cada escenario generado en el proceso de cartografiado colaborativo desde una doble perspectiva: por un lado, valorar si la reconfiguración del espacio establecida por los participantes del taller se corresponde con las descripciones de los escenarios y, por otra parte, obtener resultados aplicables al diseño y calibración de modelos de simulación, para así configurar una técnica robusta y completa de soporte para la planificación.

El presente artículo se estructura de la siguiente forma: la sección 2 trata el caso de estudio, la información de partida y la metodología desarrollada, exponiendo el Análisis Exploratorio de Datos (AED), las variables independientes y dependientes, el desarrollo y calibración de RLGP y la evaluación de los modelos mediante la comparación de resultados y la aplicación del estadístico ROC; en la sección 3 se exponen los resultados obtenidos; en la sección 4 se discuten los resultados y, por último, en la sección 5, se narran las conclusiones.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. CASO DE ESTUDIO

Para alcanzar el objetivo establecido, se utilizó como caso de estudio un sector del Corredor del Henares (Madrid – Guadalajara) (figura 1). Este se caracteriza por ser un espacio metropolitano estructurado a lo largo del río Henares y otras infraestructuras de transporte como la autovía A-2 y las líneas de AVE y ferrocarril que conectan Madrid – Zaragoza – Barcelona. Su fuerte carácter urbano industrial y su dinamismo demográfico han impulsado las relaciones entre los municipios del eje del corredor con otros de la periferia metropolitana, experimentando sustanciales desarrollos urbanos a lo largo del último siglo. Así, en los últimos 30 años, la población cercana al límite entre Madrid y Guadalajara se ha incrementado en un 40 % como causa del proceso de urbanización (García Rodríguez & Pérez González, 2014).

Ya en el periodo 1988 – 2018, esta zona contaba con un índice de crecimiento medio de superficie urbana del 3,4 % anual, destacando el fuerte auge del uso residencial unifamiliar e industrial. Desde el punto de vista de la planificación existente, el gobierno regional de Madrid ha desarrollado diversos planes estratégicos (Plan Estratégico de movilidad sostenible de la Comunidad de Madrid (2013 – 2025) y Plan Estratégico/Económico Activa Henares), además del surgimiento de otros proyectos logísticos (ALMA Henares) de gran envergadura en el Corredor, con importantes repercusiones territoriales, especialmente en temas de transporte, infraestructura y vivienda. Este fuerte dinamismo hace que el presente caso de estudio resulte de especial interés para aplicar metodologías prospectivas que permitan determinar los principales factores que condicionan los cambios y distribución de los usos del suelo y los sistemas de transporte. Al mismo tiempo, se ofrece la oportunidad de comparar posibles escenarios de desarrollo futuro con la planificación trazada por las entidades competentes.

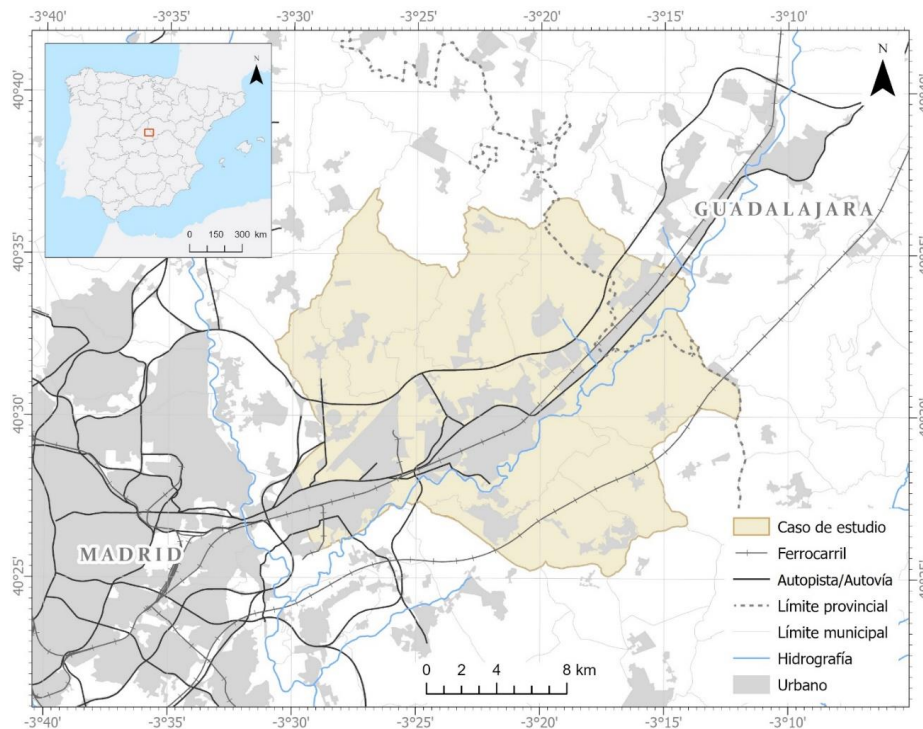


Figura 1. Localización del caso de estudio.

2.2. DATOS DE PARTIDA

Los datos de partida fueron obtenidos de un taller de cartografía colaborativa celebrado en junio de 2019, partiendo de tres narrativas para el año 2050, generadas previamente a partir de un conjunto de encuestas a la ciudadanía, que ofrecían distintas líneas futuras de desarrollo del Corredor del Henares, con diferentes grados de disrupción. Un grupo de expertos en diversos campos relacionados con la planificación urbana y el transporte, colaboraron conjuntamente para ubicar espacialmente los posibles desarrollos urbanos asociados a cada narrativa. En la tabla 1 se describen brevemente estas tres narrativas (y sus implicaciones espaciales).

La localización de los cambios de uso urbano en el taller fue posible gracias al empleo de una cartografía base compuesta por una cuadrícula de 250 m x 250 m de tamaño de celda, mostrando el uso del suelo que se pretendía representar espacialmente: servicios y equipamientos, industrial, residencial unifamiliar, residencial multifamiliar y residencial mixto. Esta cartografía fue utilizada como lenguaje común para la comunicación entre los diferentes expertos (arquitectos, promotores, planificadores del transporte, etc.) que participaron en el taller. Tras su desarrollo, se obtuvieron los mapas que incorporaban los nuevos crecimientos, los cambios y las pérdidas de cada uso. Dado que su representación mostraba una información generalizada debido al tamaño de la celda, y con el objetivo de generar un conjunto de datos a escala local, se digitalizó la información, representándola en el parcelario catastral a partir de la intersección de las nuevas celdas con las parcelas correspondientes, así como las nuevas infraestructuras viarias diseñadas por los expertos (figura 2). De esta manera, se obtuvieron las variables dependientes que fueron utilizadas para cada modelo (crecimiento y cambios de cada uso). Las variables independientes se derivaron igualmente a partir de la cartografía resultado del taller. En este punto, cabría resaltar que la parcela catastral ha sido utilizada como base para aplicar la metodología desarrollada. Su estructura irregular aporta un mayor realismo en cuanto a la división del espacio geográfico, proporcionando información detallada de la propiedad del suelo y siendo utilizada como unidad de referencia espacial del planeamiento urbanístico español (Barreira-González et al., 2015).

Tabla 1. Aspectos destacados de las narrativas de los escenarios futuros.

Escenario	Descripción
Centros históricos no motorizados	Esta narrativa plantea un corredor con alta mezcla de funciones incluyendo residencia, compras, ocio y áreas industriales o empresariales. Se transformarían las actuales áreas industriales y tecnológicas en lugares más multifuncionales, a la vez que los centros urbanos recuperarían una movilidad netamente no motorizada, lo que propiciaría un mayor desarrollo de viviendas en altura para incrementar la densidad urbana y reducir distancias de viaje. Se establecería una amplia red de espacios verdes que articularían todo el corredor. Las estaciones de transporte público se localizarían en superficie y estarían fuertemente integradas con la red de espacios verdes. Caminar e ir en bicicleta serían los modos preferentes para la población residente. El coche tendría un papel residual, siendo más importante y usado el transporte público.
Un corredor superpoblado	También caracterizado por una alta mezcla de funciones residenciales, ocio, compras e industria y, por tanto, con ausencia de espacios monofuncionales. Se trataría de un territorio polarizado: centros urbanos ocupados por rentas más bajas en bloques de mediana altura y periferia ocupada por rentas más altas en viviendas unifamiliares. Se establecería una amplia red de espacios verdes que articularían todo el corredor. Las estaciones de transporte público estarían en superficie y fuertemente integradas con la red de espacios verdes. Se reduciría el uso del coche privado, mientras que el transporte público tendría niveles similares a los actuales, con preferencia por los sistemas ferroviarios.
Altos niveles de inseguridad ciudadana	En este escenario se produciría una baja mezcla de funciones como residencia, ocio, compras e industria. Predominarían los espacios monofuncionales. En los centros urbanos prevalecería el comercio, los servicios y las viviendas para clases más bajas. Los estratos con rentas más altas de la población aspirarían a vivir en la periferia, en viviendas unifamiliares distribuidas en urbanizaciones cerradas y protegidas. Los espacios verdes públicos no tendrían protagonismo en el corredor. Aumentaría el uso del vehículo privado y disminuirían las zonas de movilidad peatonal o en bicicleta.

2.3. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el modelado de los resultados del taller mediante RLGP, es imprescindible concretar dos aspectos fundamentales en el proceso de representación espacial de cambios de usos del suelo, como son la determinación de la cantidad de cambio y la localización de este. A este respecto, en el presente trabajo, la determinación de la cantidad de superficie fue obtenida a partir de la opinión de los expertos para cada escenario (tabla 2), mientras que la localización de los nuevos desarrollos vendrá determinada por el potencial de transición del parcelario para cada uso. Por tanto, para identificar aquellas parcelas de mayor aptitud y determinar qué factores explicativos tuvieron mayor influencia en la localización de los usos del suelo para cada escenario, se aplicó el modelo de Regresión Geográficamente Ponderado (RGP, en inglés *Geographically Weighted Regression*, GWR) desarrollado por Brunsdon et al. (1996). La aplicación de esta metodología se justifica principalmente por el carácter espacial de los datos, ya que los modelos RGP se utilizan, precisamente, para observar relaciones espaciales que los modelos de regresión logística no permiten estudiar (Fotheringham, Brunsdon, & Charlton, 2002).

Para la aplicación de esta técnica, se crearon modelos únicamente para los usos que experimentaron crecimiento en cada escenario, no considerando aquellos que no presentaron un aumento de superficie (estabilidad o pérdida; ver tabla 2). De este modo, se desarrollaron ocho modelos, tres para el escenario Centros históricos no motorizados (para modelar los usos del suelo “Servicios y equipamientos”, “multifamiliar” y “mixto”), cuatro para el escenario Un corredor superpoblado (usos “Servicios y equipamientos”, “unifamiliar”, “multifamiliar” y “mixto”) y uno para el escenario Altos niveles de inseguridad ciudadana (uso “unifamiliar”).

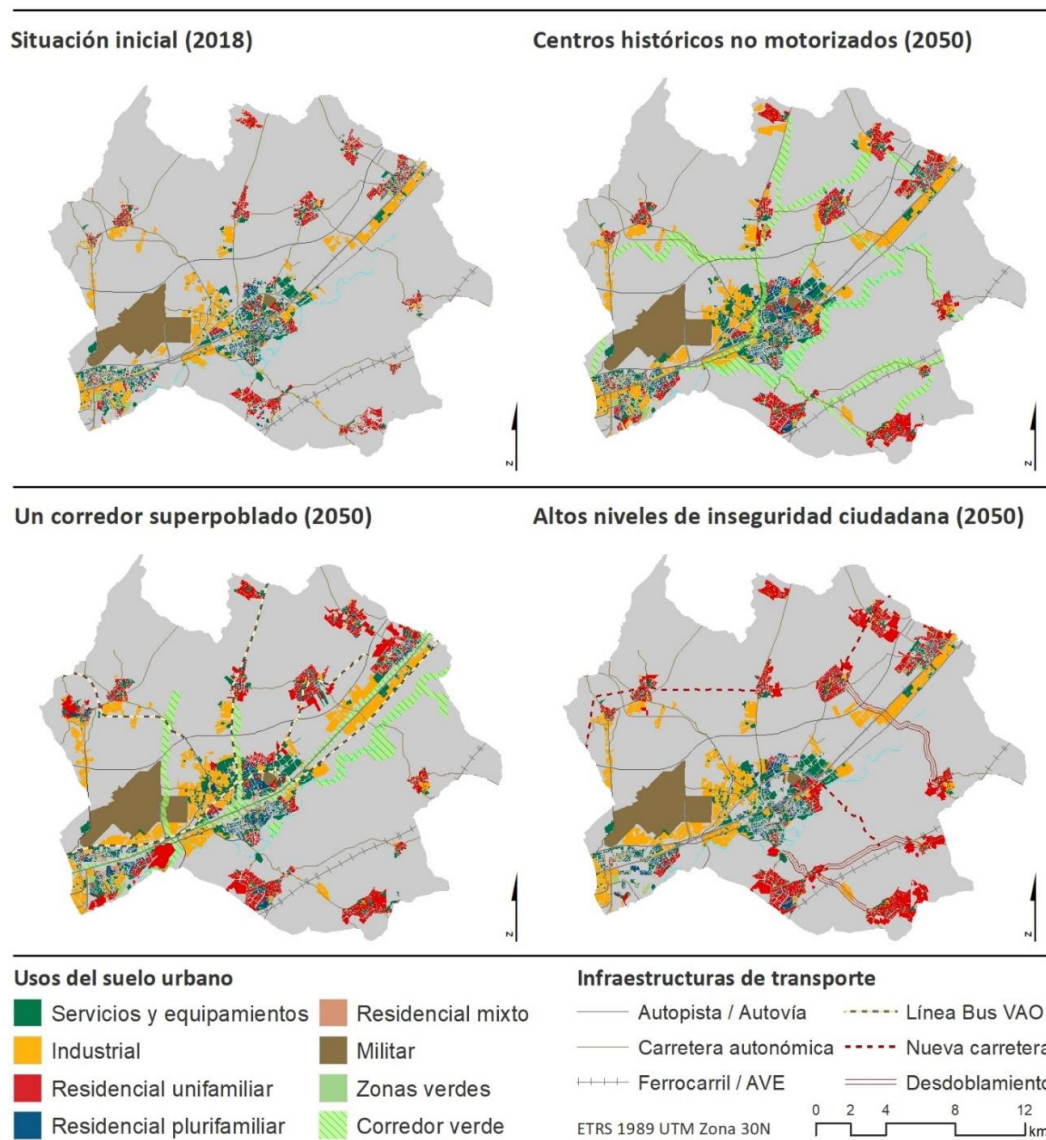


Figura 2. Representación espacial de los escenarios futuros.

Tabla 2. Evolución de los usos por escenario para el periodo 2018 – 2050.

Uso del suelo urbano	Escenario		
	Centros históricos no motorizados	Un corredor superpoblado	Altos niveles de inseguridad ciudadana
Servicios y equipamientos	Crece moderadamente	Crece moderadamente	Estable
Industrial	Estable	Estable	Pierde ligeramente
Residencial unifamiliar	Pierde ligeramente	Crece moderadamente	Crece intensamente
Residencial multifamiliar	Crece ligeramente	Crece ligeramente	Estable
Residencial mixto	Crece ligeramente	Crece ligeramente	Pierde ligeramente

*En negrita aquellos modelos desarrollados para los usos del suelo con crecimientos.

Todos los modelos desarrollados en esta investigación han sido ejecutados mediante R (<https://www.r-project.org/>) en su versión 3.6.3 y su IDE *RStudio* (<https://rstudio.com/>). Para ello, la principal librería utilizada ha sido *GWmodel* (Gollini, Lu, Charlton, Brunsdon, & Harris, 2015), un paquete que contiene técnicas de una rama de la estadística espacial, concretamente modelos de ponderación geográfica.

La metodología aplicada en la presente investigación sigue la secuencia mostrada en la figura 3, que se resume en varios bloques: Análisis Exploratorio de Datos previo al análisis de regresión y selección de variables independientes; elaboración de los modelos logísticos geográficamente ponderados; y evaluación de los modelos obtenidos.

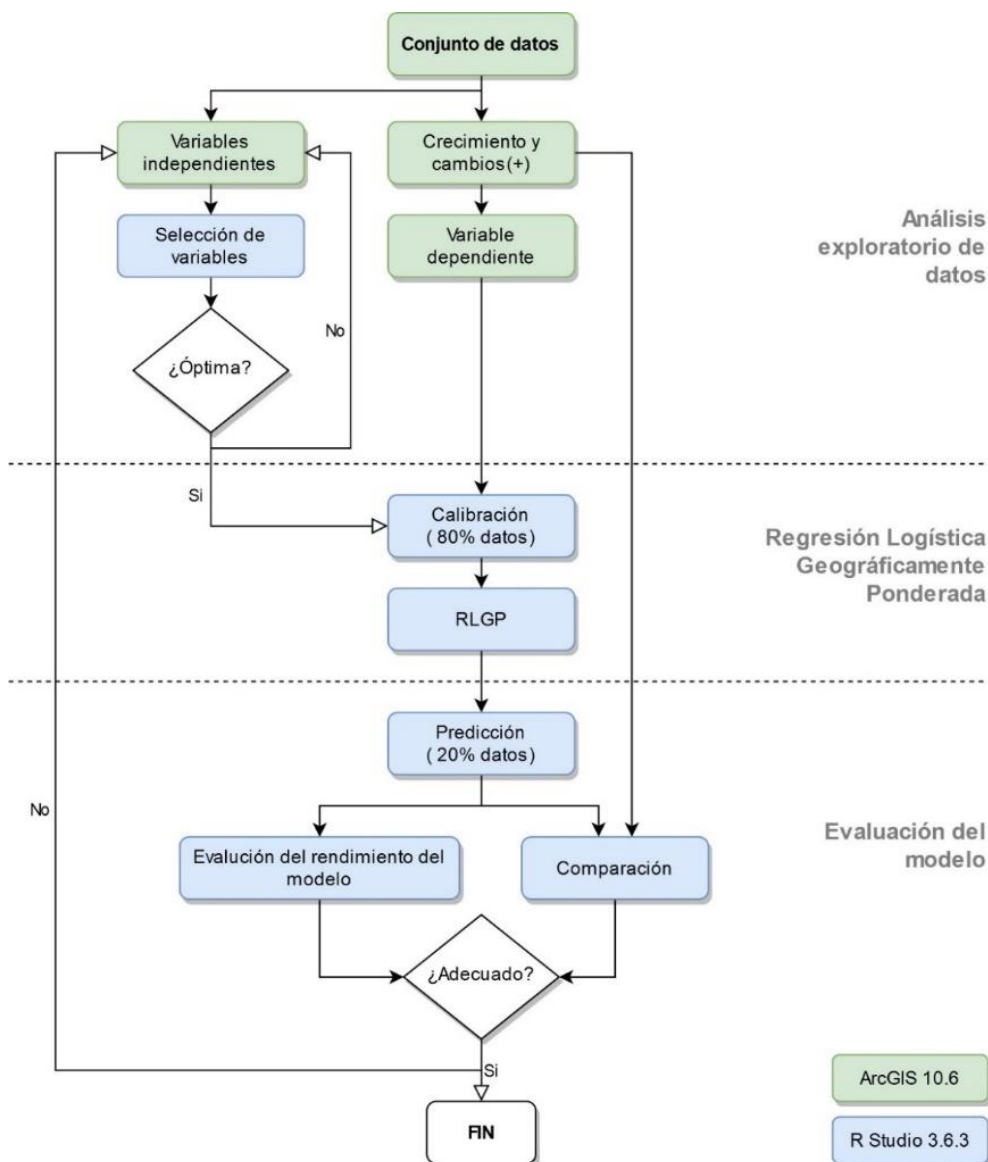


Figura 3. Flujograma metodológico.

La selección de las variables explicativas del fenómeno de expansión urbana se realizó, en primer lugar, a partir de una revisión bibliográfica para identificar los factores que pudiesen expresar las relaciones espaciales con dicho fenómeno para cada uso (Barreira-González et al., 2017; Guanglong et al., 2017; Mirbagheri & Alimohammadi, 2017). Concretamente, este proceso de

selección se ha visto apoyado en diversos estudios que identifican un amplio abanico de variables explicativas del crecimiento urbano para la Comunidad de Madrid (Díaz-Pacheco & Hewitt, 2013; Plata Rocha et al., 2011). Variables como la altitud, pendiente o la distancia a las principales vías de comunicación están presentes también en numerosos estudios internacionales (Guanglong et al., 2017; Hu & Lo, 2007; Shafizadeh-Moghadam, 2019; Shafizadeh-Moghadam & Helbich, 2015). Por su parte, la accesibilidad fue calculada de dos formas: mediante la distancia desde un punto hasta la sección de la red viaria más cercana (variable Dist. a carreteras) y, de una manera más realista, a través de la fricción o coste de desplazamiento en función del nivel jerárquico de las distintas carreteras teniendo en cuenta la velocidad límite establecida (variable Accesibilidad). De manera complementaria, para aportar mayor precisión al modelo, se analizaron otras variables fruto de la discusión entre los participantes del taller colaborativo, así como de la observación de los factores tenidos en cuenta a la hora de asignar un nuevo uso por parte de los expertos. En la figura 4 se observan todos los factores inicialmente recogidos y cartografiados mediante *TerrSet* 18.21 y *ArcGIS Desktop* 10.6.

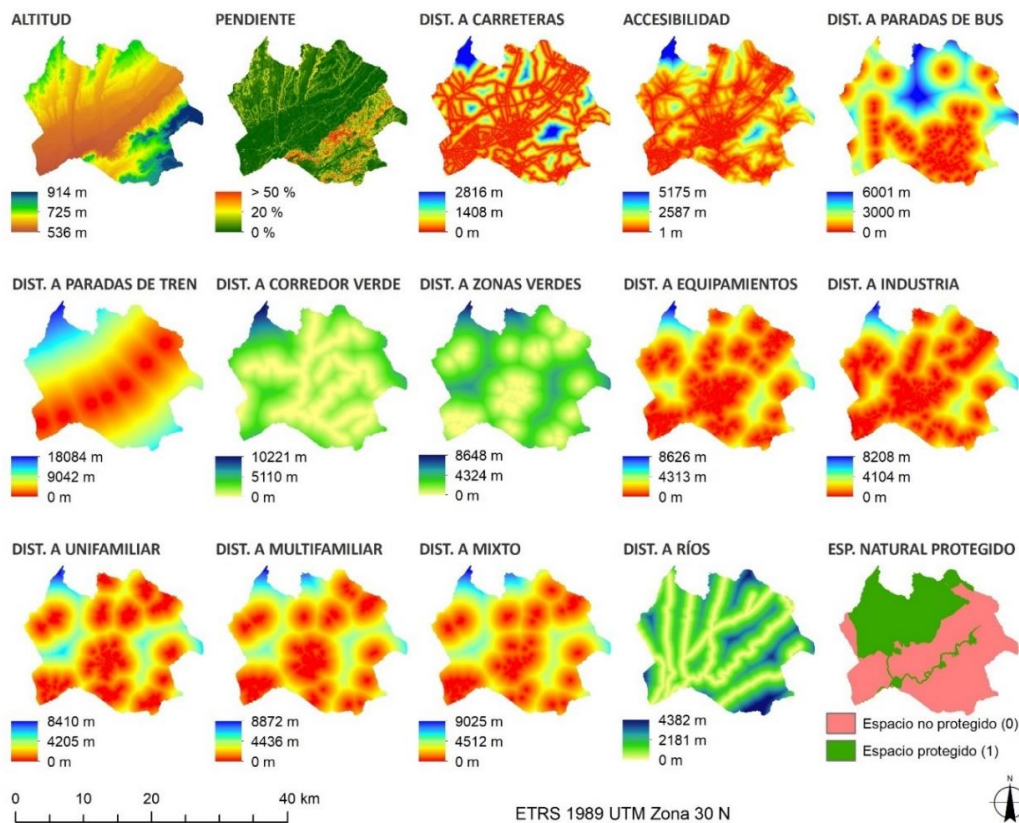


Figura 4. Variables independientes recogidas.

A partir de este conjunto de variables se realizó un AED con la finalidad de generar una base de datos robusta, evitando valores ausentes, repetidos o fuera de rango y buscando aquellas variables que presentaban relación con la variable respuesta, es decir, observando qué factores podrían intervenir en el proceso de crecimiento urbano. Otro aspecto relevante considerado es la presencia o ausencia de autocorrelación espacial en las variables independientes. Esta frecuente característica de los datos espaciales no se recoge en los modelos globales (Duque et al., 2011), por lo que es determinante a la hora de elegir el modelo de regresión que se debe aplicar.

Mediante una matriz de correlaciones bivariadas (figura 5) se excluyeron aquellas variables que presentaban una elevada correlación para evitar la multicolinealidad, tomando como valor crítico $\pm 0,7$, umbral a partir del cual el par de variables se consideraría redundante y podría dar lugar a un modelo inestable y poco confiable (Clark & Hosking, 1986). Una correlación moderada o fuerte entre dos variables explicativas revela una elevada interdependencia. En este sentido, dicha correlación de los coeficientes de regresión locales invalidaría cualquier interpretación que pueda hacerse sobre el modelo, pudiendo derivar en conclusiones erróneas (Wheeler & Tiefelsdorf, 2005).

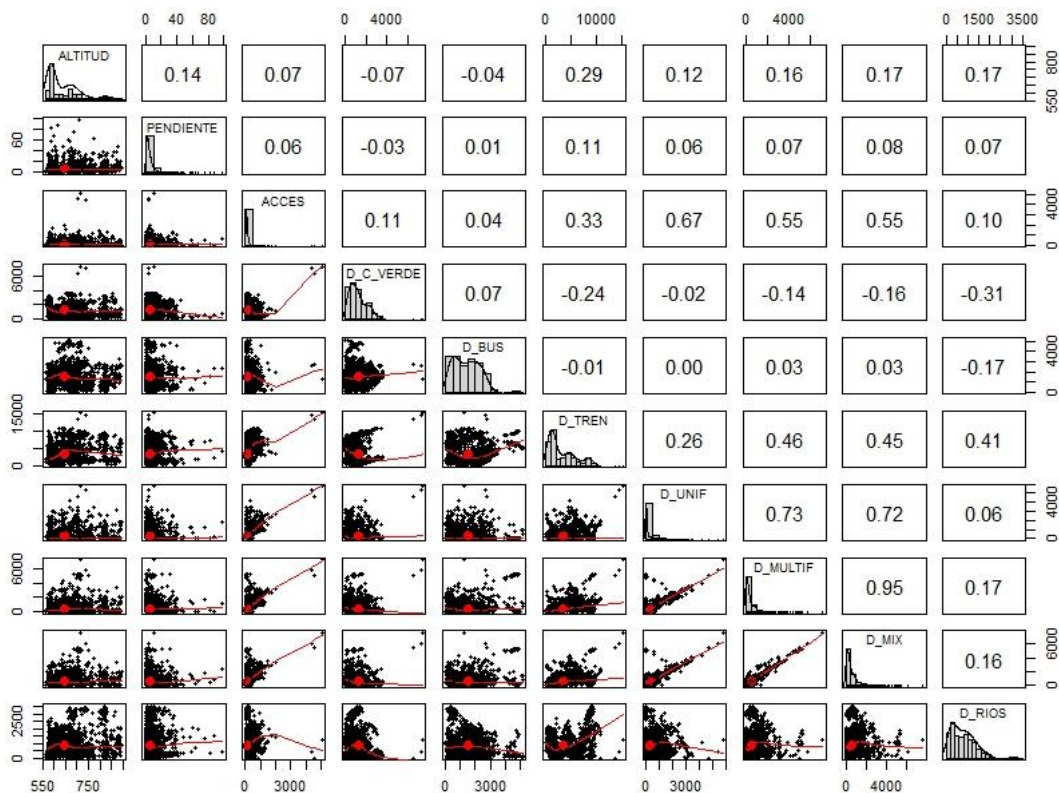


Figura 5. Matriz de correlaciones bivariadas de las variables independientes.

Variable dependiente

La variable dependiente de cada modelo se obtuvo de la digitalización de los mapas resultantes del taller, de los cuales se extrajo una muestra que el modelo RLGP pudiese procesar de manera eficiente. Así, el conjunto de datos seleccionado se estructuró en función de la cantidad de crecimiento estipulada para cada escenario. El número de puntos varía desde 435, para el modelo de uso “residencial mixto” del escenario Centros históricos no motorizados, a 6900 puntos para el modelo de “servicios y equipamientos” del escenario Un corredor superpoblado. Posteriormente, se hizo una división para realizar la calibración del modelo, recogiendo un 80% de los datos para el entrenamiento, y un 20% restante para la evaluación de los resultados. Cabe mencionar que los datos procedentes de parcelas catastrales fueron recogidos a partir del centroide de estas, configurando un marco de datos por puntos, a partir de los cuales se extrajo el valor por localización de las variables independientes procesadas en formato ráster.

Así, en primer lugar, dichos crecimientos se binarizaron, marcando como (1) los puntos que no tenían uso asignado y habían recibido un nuevo uso concreto (crecimiento) o aquellos que

anteriormente pertenecían a un uso, pero este había sido modificado, y (0) aquellos puntos que mostraron persistencia en el periodo en cuestión (2018 – 2050), ya presentarán un uso concreto o no. Un total de ocho conjuntos de datos fueron seleccionados para la aplicación del modelo.

Una cuestión para tener en cuenta fue la aplicación del modelo, no al total de suelo urbano, sino a los distintos usos del suelo urbanos seleccionados en un espacio metropolitano extenso como el caso de estudio escogido, ya que los puntos de datos que marcan crecimiento, en ocasiones apenas representaban el 1% del total, por lo que se requirieron medidas para adecuar el conjunto de datos al modelo asignado. Así, dada la gran cantidad de parcelas que componen el caso de estudio en referencia a las parcelas que indicaban crecimiento, los conjuntos de datos tuvieron que balancearse. Se recogió el total de parcelas que marcaban crecimiento (valor 1) para cada uso concreto (hasta cierto límite para agilizar el procesado computacional), seleccionando posteriormente la misma cantidad de parcelas que no aplicaban crecimiento (valor 0) de forma aleatoria. De esta manera, el número de puntos codificados como 1 era equivalente al número de puntos codificados como 0 (Guanglong et al., 2017).

Regresión Logística Geográficamente Ponderada (RLGP)

Los modelos globales, como pueden ser los modelos de regresión logística, generan un único conjunto de coeficientes para el área total analizada, expresando que un factor tiene el mismo efecto en toda el área estudiada (Guanglong et al., 2017). Se entiende, por consiguiente, que los tradicionales modelos de regresión logística asumen el mismo poder explicativo para todo el conjunto de datos, presentando homogeneidad en los datos espaciales, independientemente de su localización (Pineda Jaimes et al., 2010). La ecuación del modelo logístico se traduce en:

$$y_i = \ln \left(\frac{P_i}{1 - P_i} \right) = \beta_0 + \sum_n \beta_n x_n + \varepsilon_i$$

donde la variable dependiente y_i es igual al ln de la probabilidad de ocurrencia del fenómeno de crecimiento de un determinado uso P_i , dividido entre la probabilidad de no ocurrencia $1 - P_i$, lo que se conoce como Odds. β_0 es el intercepto, β_n el coeficiente de regresión, x_n el valor de la variable explicativa n y ε_i es el error aleatorio en un punto i .

Asumiendo que las relaciones varían a lo largo del espacio, los modelos anteriormente mencionados pueden ocultar variaciones espaciales potencialmente interesantes, impidiendo un ajuste más preciso de los datos (Fotheringham et al., 2002). En este sentido, los datos espaciales presentarán una cierta variabilidad dependiendo de su ubicación. De este modo, para ajustar la fórmula anterior teniendo en cuenta la ubicación de los puntos de datos según Fotheringham et al. (2002), RLGP se presenta como:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_n \beta_n(u_i, v_i)x_n + \varepsilon_i$$

donde la diferencia con respecto al modelo global se observa en (u_i, v_i) , que representan las coordenadas para un punto i . Este modelo ajusta una regresión para cada punto teniendo en cuenta un número determinado de vecinos cercanos (Fotheringham et al., 2002). La distancia a partir de la cual se establece el número óptimo de vecinos más próximos considerados en el modelo se establece a partir del ancho de banda, el cual puede ser adaptativo o fijo. En el ancho de banda fijo, el modelo es calibrado teniendo en cuenta una distancia fija a partir de cada punto, mientras que el ancho de banda adaptativo recoge el número de vecinos más próximos, por lo que la distancia variará dependiendo de cada punto de regresión local y de la distribución espacial del conjunto de datos, es decir, el *kernel* presentará un ancho de banda mayor en aquellas ubicaciones

donde se dé una dispersión de puntos elevada, y un ancho de banda menor donde se dé una abundancia de puntos (Fotheringham et al., 2002).

Al mismo tiempo, el modelo permite asignar una mayor ponderación a aquellos puntos más cercanos respecto al punto de regresión local (Fotheringham et al., 2002). Para ajustar los pesos asignados, existen distintas funciones *kernel* (*Gaussian*, *Exponential*, *Box-car*, *Bi-square*, *Tri-cube*). En la presente investigación se ha aplicado la función *Gaussian*, que ofrece una ponderación máxima de 1, decreciendo según una distribución de tipo gaussiana conforme aumenta la distancia entre el punto observado y el calibrado (Gollini et al., 2015):

$$w_{ij} = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{d_{ij}}{b}\right)^2\right)$$

donde d_{ij} es la distancia entre el punto i y el punto j y b es el ancho de banda. De esta manera, se obtiene el peso asignado de la diagonal de la matriz de pesos geográficos w_{ij} .

Una vez seleccionado el tipo de ancho de banda y la función *kernel* a aplicar, para calibrar la función de ponderación espacial, las aproximaciones más frecuentes son *cross-validation* (CV) (Cleveland, 1979) y *Akaike Information Criterion* (AIC) (Akaike, 1973). En este caso, debido a su aplicación más generalizada en modelos de tipo Poisson y logísticos (Fotheringham et al., 2002), se escogió la minimización del valor AIC, en su versión corregida (AICc), que toma un mejor ajuste ante muestras de pequeño tamaño (Hurvich & Tsai, 1989).

Evaluación del modelo RLGP

El primer método para validar el modelo RLGP consistió en el empleo del valor pseudo R^2 de la calibración. Dicha información permite obtener una primera aproximación del grado de ajuste del modelo local (Rodrigues, de la Riva, & Fotheringham, 2014). A su vez, para observar si existen problemas de inferencia derivados de la subestimación de los errores estándar de los parámetros (Fotheringham et al., 2002), se analizaron los residuos del modelo aplicando la medida estadística I de Moran.

Por otra parte, y tomando como datos de partida el 20% del conjunto total reservado, se realizó una matriz de confusión para evaluar el desempeño de cada modelo y observar así su capacidad predictiva. Partiendo de la probabilidad de crecimiento estimada por cada modelo, se estableció un valor de corte para determinar el umbral a partir del cual se consideraba valor 0 o valor 1, intentando obtener los valores que mejor se acercasen a la variable observada. Una vez establecido el umbral y construida la matriz, se calculó una serie de métricas que ayudaron a evaluar mejor cada modelo.

La exactitud indica la proporción entre los crecimientos estimados correctamente y el total de casos que el modelo consideraba que crecerían. La precisión, por su parte, indica un buen ajuste del modelo, y se traduce en la proporción entre el número de estimaciones acertadas frente al total.

Tras el cálculo de las métricas de la matriz de confusión, se utilizó finalmente como técnica complementaria de validación la curva ROC (Relative Operating Characteristic), muy utilizada para evaluar modelos que pretenden clasificar algún tipo de fenómeno o evento (Mas et al., 2013), y especialmente para cambios en la cobertura y usos del suelo (Hu & Lo, 2007; Mas et al., 2013).

Si la variable a estimar es binaria, se parte de la idea de que, si no se utilizara ningún modelo, la probabilidad de acierto sería del 50% (0 o 1). Esta situación se ve marcada con una diagonal al graficar la curva ROC, también denominada línea de no discriminación, marcando un índice

uniforme (Pontius & Parmentier, 2014). La propia curva se construye a partir de la tasa de verdaderos positivos, indicada por la sensibilidad del modelo, representada frente al valor obtenido al restar una unidad a la especificidad (tasas de falsos positivos). Lo que permite esta técnica es revelar la capacidad discriminadora del modelo en cuestión, es decir, la habilidad para distinguir las ubicaciones que muestran crecimiento y las que no. Dicho parámetro se calcula a partir del AUC (*Area Under Curve*) y suele utilizarse para comparar mapas de probabilidad (Mas et al., 2013).

3. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. RESULTADOS DEL AED

Tras seleccionar el conjunto de factores como posibles predictores para cada modelo, se introdujeron aquellos que pasaron el filtro de la metodología aplicada. Todos ellos fueron estandarizados entre 0 y 1, permitiendo la comparación entre factores y la posibilidad de estudiar interacciones en el caso de que existiesen. La tabla 3 muestra una breve descripción de las variables introducidas. Cabría destacar que estas variables seleccionadas no fueron aplicadas a un mismo modelo, sino que conforman el total de las escogidas en los ocho modelos.

De entre las variables recogidas, la distancia a carreteras, la distancia a zonas verdes urbanas, la distancia a los usos servicios y equipamientos e industrial y la presencia/ausencia de espacios naturales protegidos no fueron seleccionadas en ningún modelo debido a que presentaban una elevada correlación positiva o negativa ($> 0,7$ o $< -0,7$) con otras variables escogidas de mayor interés. En determinados casos, es posible observar una elevada correlación entre dos o más variables seleccionadas tras el AED. La distancia al uso residencial mixto y la distancia al uso residencial multifamiliar presentan un valor de correlación de 0,95. Del mismo modo ocurre con la distancia al uso residencial unifamiliar. Esta cuestión se debe a que estas variables no se utilizaron de forma conjunta en un único modelo, sino que se introdujeron en distintos modelos. Así mismo, todas las variables descritas en la tabla tres presentaban autocorrelación espacial.

Tabla 3. Descripción y fuente de las variables escogidas para el estudio

Variable	Descripción	Fuente
ALTITUD	Altura sobre el nivel del mar	MDT25 (IGN1)
PENDIENTE	Grado de inclinación del terreno en relación con la horizontal	MDT25 (IGN1)
ACCES	Coste de desplazamiento desde cualquier punto de la red viaria a cualquier punto del territorio, medido en función del tipo de vía (convencional, doble carril, autovía, autopista)	BCN100 (IGN1)
D_C_VERDE	Distancia a nuevos corredores verdes diseñados por los expertos	Taller2
D_BUS	Distancia a las paradas de autobús (urbanas e interurbanas)	CRTM3
D_TREN	Distancia a las estaciones y apeaderos de la red ferroviaria de cercanías	CRTM3
D_UNIF	Distancia al uso residencial unifamiliar	DGC4
D_MULTIF	Distancia al uso multifamiliar (bloques en altura)	DGC4
D_MIX	Distancia al uso residencial mixto (viviendas y comercio o servicios)	DGC4
D_RIOS	Distancia a la red hidrográfica de cursos permanentes	BCN100 (IGN1)

1Instituto Geográfico Nacional

2Taller de Cartografía Colaborativa. Proyecto TRANSURBAN

3Consortio Regional de Transportes de Madrid

4Dirección General del Catastro. Ministerio de hacienda

3.2. RESULTADOS DE LA RLGP

A continuación, se muestran los resultados principales de los modelos destinados a explicar el crecimiento de cada uno de los usos en función de los tres escenarios. En la tabla 4 se observan las variables dependientes seleccionadas para cada modelo, que aportan valor explicativo al proceso de crecimiento de cada uso. En todos los casos se buscó aquel modelo acorde al principio de parsimonia, minimizando el valor AICc e intentando explicar el mayor porcentaje de variabilidad del modelo, haciéndolo lo más sencillo posible. Así, puede observarse que el número de variables utilizadas varía entre 3 y 5.

Tabla 4. Variables utilizadas para cada uso en el modelo RLGP

Factores	Escenario 1			Escenario 2			Escenario 3	
	EQP	MLTF	MIX	EQP	UNIF	MLTF	MIX	UNIF
ALTITUD		✓	✓			✓	✓	
PENDIENTE						✓		
ACCES						✓		✓
D_C_VERDE	✓	✓		✓	✓	✓		
D_BUS	✓	✓	✓	✓	✓			
D_TREN			✓	✓	✓		✓	✓
D_UNIF					✓		✓	✓
D_MULTIF				✓				
D_MIX		✓						
D_RIOS	✓	✓	✓	✓				

EQP: Servicios y equipamientos, MLTF: Residencial multifamiliar, MIX: Residencial mixto y UNIF: Residencial unifamiliar.

A modo de ejemplo, se han comparado los resultados obtenidos del ajuste del modelo para el uso “residencial unifamiliar” del escenario Un corredor superpoblado, tanto para el modelo global como para el modelo RLGP. A este respecto, la tabla 5 recoge los valores resultantes de las estimaciones del ajuste para el modelo de regresión logística global y la tabla 6 para el modelo RLGP. La notable mejoría del modelo RLGP respecto a la regresión logística global, se observa en los valores pseudo R² (0,58 frente a 0,02) y AICc (2851 frente a 4312,63) del modelo tomado como ejemplo. Estos valores demuestran la adecuación de este enfoque para ser implementado en datos espaciales, presentando resultados difícilmente identificables en el modelo logístico global.

Tabla 5. Resultados derivados del modelo de regresión logística global.

(Esc. 2 Un corredor superpoblado – Uso residencial unifamiliar)

	Estimado	Error Estd.	Valor z	Pr(> z)	Signif.
Intercepto	0,28	0,09	3,12	0,001	**
D_BUS	-0,86	0,17	-4,93	8,07E-07	***
D_TREN	1,20	0,19	6,3	2,98E-10	***
D_UNIF	1,43	0,32	4,42	9,63E-06	***
D_C_VERDE	-2,73	0,38	-7,25	4,16E-13	***

Códigos de signif.: 0 ‘***’ / 0,001 ‘**’ / 0,01 ‘*’ / 0,05 ‘.’ / 0,1 ‘‘

Tabla 6. Resumen de las estimaciones generalizadas de los coeficientes de RLGP.

(Esc. 2 Un corredor superpoblado – Uso residencial unifamiliar)

	Min.	1st Qu.	Median	3rd Qu.	Max.
Intercept	-27,24	-1,70	0,19	2,35	37,04
D_BUS	-31,18	-3,50	-0,59	1,92	39,97
D_TREN	-54,33	-2,38	0,51	2,95	21,91
D_UNIF	-4,57	-4,19	-0,04	4,33	56,68
D_C_VERDE	-58,92	-5,22	-0,73	3,75	83,38

Tabla 7. Resumen de los resultados de los modelos RLGP

	Escenario 1			Escenario 2			Escenario 3	
	EQP	MLTF	MIX	EQP	UNIF	MLTF	MIX	UNIF
AICc global	3735	2283	544	9483	4313	4337	3128	4310
AICc local	1868	1160	191	6390	2851	2702	1712	2372
BW	25	47	37	18	19	19	19	22
Pseudo R ² modelo global	0,02	0,12	0,11	0,01	0,03	0,02	0,01	0,02
Pseudo R ² modelo local	0,66	0,73	0,84	0,60	0,58	0,61	0,64	0,61
I. de Moran	0,06	0,07	0,11	0,01	0,04	0,04	0,03	0,03

Respecto a los resultados estadísticos de la calibración de los modelos (tabla 7), el valor de R² ajustado varía entre 0,58, correspondiente al modelo que intenta explicar el crecimiento del uso “residencial unifamiliar” del escenario Un corredor superpoblado, y 0,84, correspondiente al modelo que intenta explicar el crecimiento del uso “residencial mixto” del escenario Centros históricos no motorizados. En todos los casos, con 5 o menos variables, se explica más de la mitad de la variabilidad del crecimiento del uso del suelo urbano en cuestión. También se observa el ancho de banda que, al ser adaptativo, recoge el número de vecinos cercanos tenidos en cuenta para cada punto del conjunto de datos, por lo que la distancia variará dependiendo de la distribución de las observaciones.

Tras aplicar el proceso de calibración, algunos de los resultados más interesantes que ofrecen los modelos RLGP son el cálculo de los coeficientes locales y los *t-value*, parámetros que pueden ser cartografiados y medidos, ofreciendo superficies que representan la variabilidad espacial y las relaciones con la variable dependiente (Matthews & Yang, 2012).

Como resultado del ajuste de RLGP, los coeficientes de regresión locales (Anexo I) muestran variaciones espaciales para cada variable independiente. Desde una observación más general, los coeficientes presentan superficies bastante heterogéneas, marcando importantes variaciones sobre el territorio. En el caso concreto de la distancia a las paradas de autobús interurbano, se identifica una marcada dualidad entre la zona sur, y las zonas norte y este, posiblemente condicionada por la distribución de las propias paradas. Por su parte, respecto a la distancia de las estaciones de tren de cercanías, se observa un claro corredor de este a oeste, marcado por la red ferroviaria y la propia ubicación de las estaciones y apeaderos. La distancia a los usos unifamiliares presenta una fuerte influencia negativa en la zona sur, frente a una influencia positiva al norte y al oeste. Por último, los coeficientes locales de la distancia a corredores verdes indican un patrón bastante heterogéneo.

El estadístico local *t-value* representa el peso de la variable en el modelo, es decir, permite resaltar aquellas superficies donde suceden relaciones de interés (Fotheringham et al., 2002). Respecto a las cifras positivas, la probabilidad de crecimiento del uso en cuestión será mayor cuanto más elevado sea el valor de la covariable, siendo estadísticamente significativa en un intervalo de confianza del 97,5% con un *t-value* > 1,96. En contraposición, respecto a los valores negativos, a

menor valor de la variable ($t\text{-value} < -1,96$), mayor probabilidad de crecimiento. En el caso del ejemplo mostrado en la figura 6, se observan determinadas zonas estadísticamente significativas.

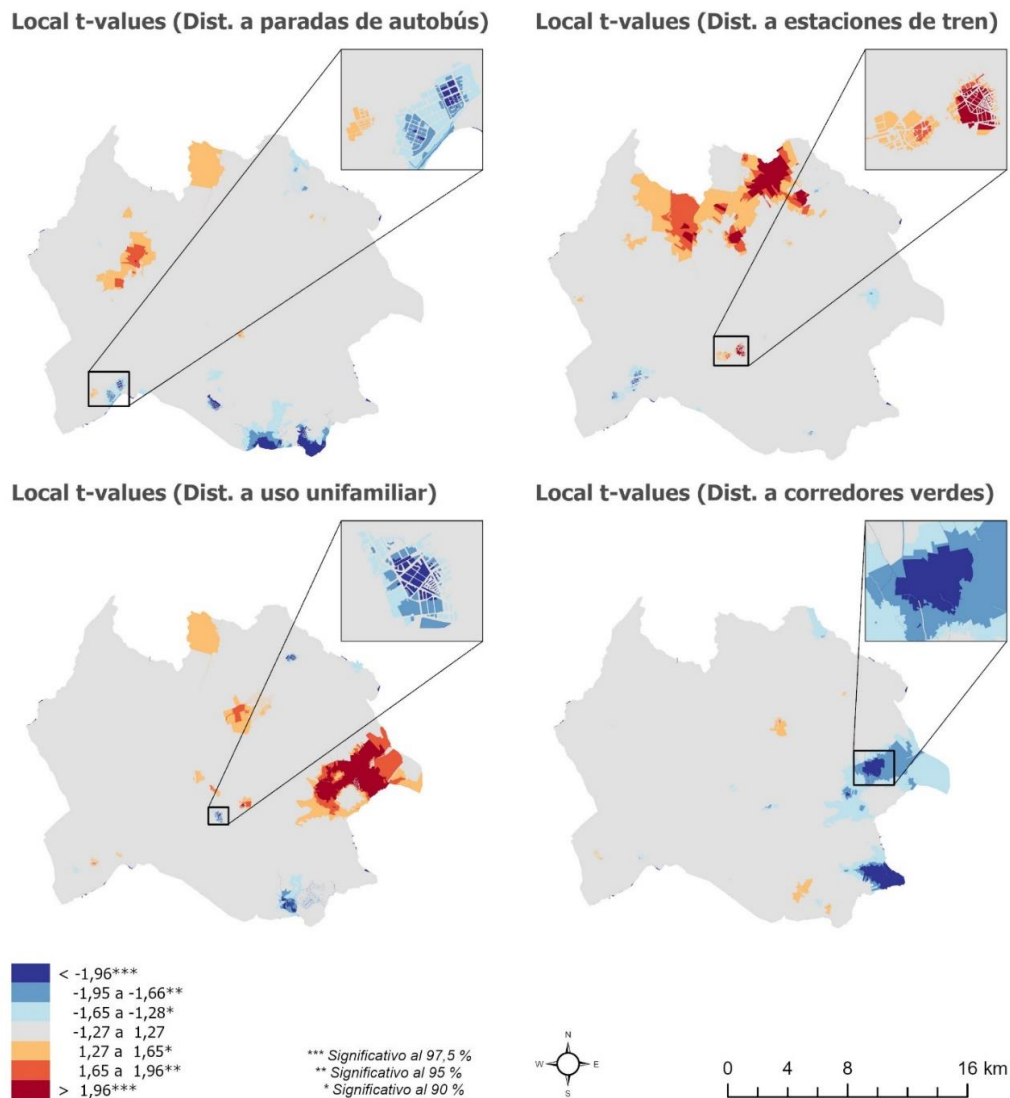


Figura 6. $t\text{-values}$ locales (Residencial unifamiliar Escenario 2).

Un análisis visual puede realizarse a partir de la figura 7, que muestra la probabilidad de crecimiento (valores entre 0 y 1) de los diferentes usos en diversos escenarios. Cabría destacar que, tanto las superficies de coeficientes de regresión locales y $t\text{-values}$, como los valores obtenidos de la probabilidad de crecimiento, fueron representados cartográficamente mediante el empleo de IDW (*Inverse Distance Weighted*) y la posterior asignación de valores a cada parcela mediante la extracción a través de los centroides de las mismas. El número de ubicaciones recogidas para calibrar el modelo varía en función de la cantidad de crecimiento de la muestra de datos. Así, los usos “residencial unifamiliar” y “servicios y equipamientos” presentan un mayor crecimiento frente a otros usos, además de observarse una mayor dispersión del crecimiento en el área de estudio. En ambos casos, principalmente en los escenarios Centros históricos no motorizados y Un corredor superpoblado, la presencia de corredores verdes y la cercanía al transporte público son claros condicionantes de la expansión de ambos usos.

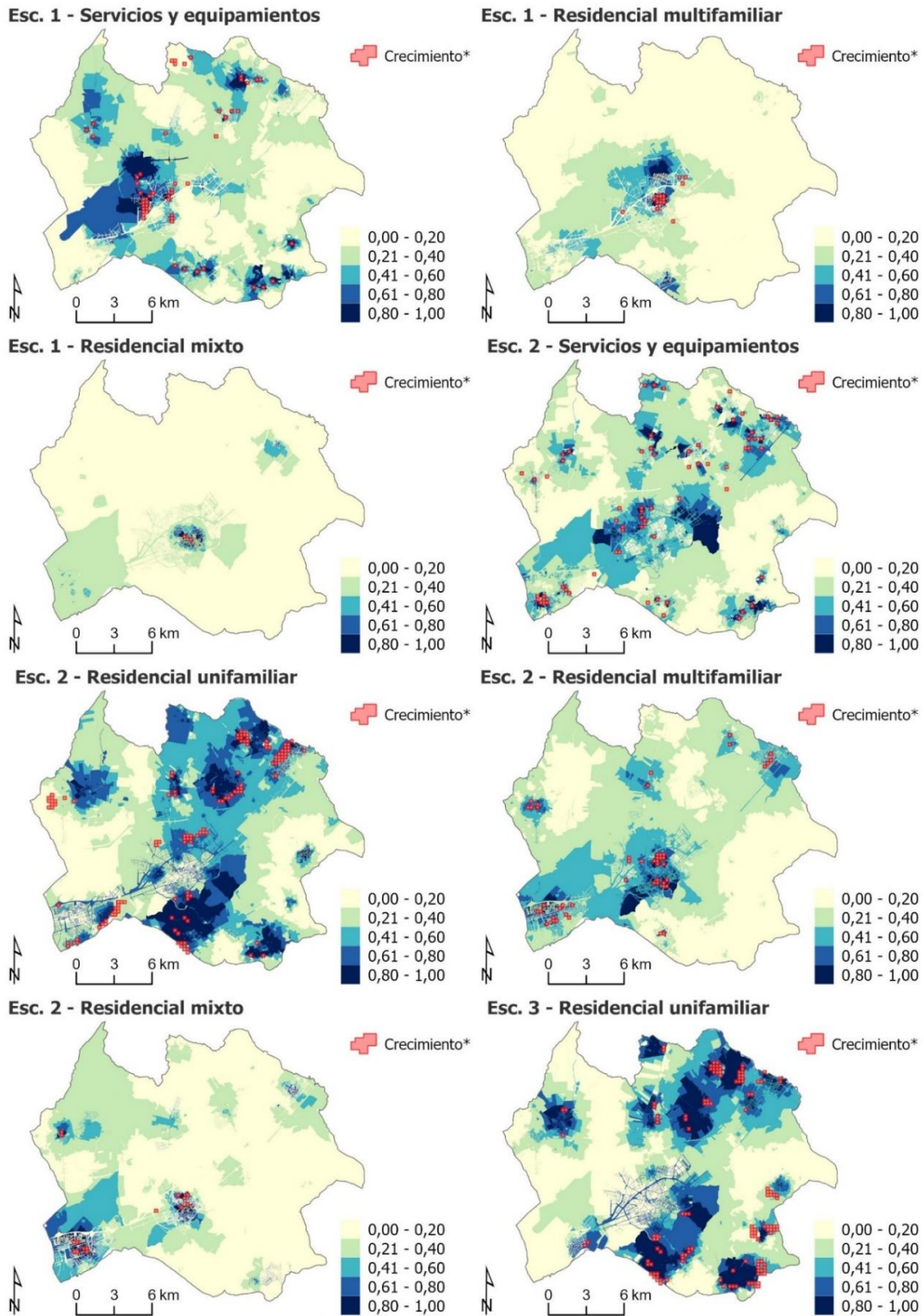


Figura 7. Probabilidad de crecimiento de los diferentes usos de cada escenario (2050).

Por otra parte, los usos “residencial mixto” y “residencial multifamiliar” muestran un menor crecimiento, ubicándose principalmente en los núcleos urbanos del eje del corredor, localizaciones de escasa elevación y pendiente. El acceso a transporte público, como la red de autobuses interurbanos y la red de tren de cercanías, demuestra una elevada significancia en

ambos modelos. Por su parte, el uso “residencial unifamiliar” presente en el escenario Altos niveles de inseguridad ciudadana muestra un crecimiento marcado por la accesibilidad por carretera (como se describe en la narrativa), aunque también por la cercanía al transporte en tren y la propia ubicación de otras urbanizaciones o espacios residenciales unifamiliares.

En la misma figura 7 se representaron los crecimientos de cada uso para 2050, indicados durante el taller de cartografía colaborativa, marcados por celdas rojas de 250 m x 250 m. En la mayoría de los casos analizados, las parcelas que presentan mayor probabilidad de crecimiento (color oscuro), coinciden con los crecimientos proyectados durante el taller (celdas rojas). En el caso del escenario Centros históricos no motorizados, los tres usos presentan unos resultados bastante precisos respecto a la ubicación. En el caso de los escenarios restantes, la coincidencia es menor, aunque también presentan buenos resultados. Visualmente, el caso que menor ajuste presenta en términos de similitud de valores estimados frente a los valores recogidos es el uso “residencial unifamiliar” del escenario Un corredor superpoblado, con el valor pseudo R^2 más bajo (0,58).

Los valores observados demuestran que la autocorrelación espacial es muy baja al acercarse los valores a 0. Esto indica que los puntos muestrales positivos de los valores medios de desviación multiplicados conjuntamente, es decir, de los productos cruzados, se encuentran bastante equilibrados respecto a los valores negativos. El valor más alto presentado (0,11) se observa en el modelo de crecimiento del uso “residencial mixto” del escenario Centros históricos no motorizados.

En la misma figura 7 se representaron los crecimientos de cada uso para 2050, indicados durante el taller de cartografía colaborativa, marcados por celdas rojas de 250 m x 250 m. En la mayoría de los casos analizados, las parcelas que presentan mayor probabilidad de crecimiento (color oscuro), coinciden con los crecimientos proyectados durante el taller (celdas rojas). En el caso del escenario Centros históricos no motorizados, los tres usos presentan unos resultados bastante precisos respecto a la ubicación. En el caso de los escenarios restantes, la coincidencia es menor, aunque también presentan buenos resultados. Visualmente, el caso que menor ajuste presenta en términos de similitud de valores estimados frente a los valores recogidos es el uso “residencial unifamiliar” del escenario Un corredor superpoblado, con el valor pseudo R^2 más bajo (0,58).

Los valores observados demuestran que la autocorrelación espacial es muy baja al acercarse los valores a 0. Esto indica que los puntos muestrales positivos de los valores medios de desviación multiplicados conjuntamente, es decir, de los productos cruzados, se encuentran bastante equilibrados respecto a los valores negativos. El valor más alto presentado (0,11) se observa en el modelo de crecimiento del uso “residencial mixto” del escenario Centros históricos no motorizados.

3.3. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL MODELO LOCAL RLGP

Respecto a una primera evaluación de los modelos, los valores R^2 presentan cifras por encima de 0,58, valores considerables para aceptar su validez. Con más detalle, extraídos de la matriz de confusión, se presentan los valores de exactitud, tasa de error, sensibilidad, especificidad, precisión, predicción negativa y AUC en la tabla 8.

El valor de exactitud más elevado se presenta en el escenario Altos niveles de inseguridad ciudadana, en el modelo de uso “residencial unifamiliar”. Por el contrario, la tasa de error más elevada se observa en el escenario Un corredor superpoblado, concretamente en el modelo de “servicios y equipamientos”, sin embargo, este no es el que presenta el valor R^2 ajustado más bajo (0,60). La precisión, por su parte, ofrece el valor más elevado en el uso “residencial multifamiliar” del escenario Centros históricos no motorizados, siendo de 0,81. Esto indica un buen ajuste del

modelo, traducida en la proporción entre el número de estimaciones acertadas frente al total. De los resultados se deduce, pues, que los valores obtenidos marcan una elevada exactitud y precisión del modelo, con bajas tasas de error, por lo que el nivel de acierto de los valores predichos es aceptado para determinar los factores escogidos para cada modelo. En el Anexo II se pueden observar las curvas ROC indicando los resultados del AUC, con valores que rondan el 0,88 y 0,97, lo que se traduciría en una elevada capacidad predictiva de los diferentes modelos al acercarse a 1.

Tabla 8. Evaluación de los modelos predictivos para cada escenario

ESC	Uso	Exactitud	Error	Sensibilidad	Especificidad	Precisión	VPN*	AUC
1	EQP	0,79	0,21	0,75	0,83	0,81	0,78	0,90
	MLTF	0,85	0,15	0,93	0,77	0,81	0,92	0,97
	MIX	0,83	0,17	0,87	0,79	0,79	0,86	0,96
2	EQP	0,78	0,22	0,83	0,74	0,76	0,82	0,88
	UNIF	0,81	0,19	0,85	0,76	0,79	0,83	0,88
	MLTF	0,81	0,19	0,90	0,74	0,75	0,89	0,92
3	MIX	0,86	0,14	0,92	0,80	0,81	0,91	0,91
	UNIF	0,87	0,13	0,91	0,83	0,81	0,92	0,93

VPN*.: Valor de Predicción Negativa.

4. DISCUSIÓN

El planteamiento de distintos escenarios de evolución de los usos del suelo constituye una herramienta adecuada para afrontar la incertidumbre relacionada con la planificación de crecimientos urbanos futuros. En el presente caso de estudio, el criterio y la experiencia de expertos en el campo de la planificación urbana y el transporte ha sido el principal medio para la interpretación y plasmación de narrativas de visiones futuras sobre una base cartográfica. Sin embargo, esta cuestión planteó la siguiente pregunta: ¿es posible justificar las decisiones tomadas por los expertos para validar su criterio en cuanto a la distribución localizada de los distintos usos y la red de transporte? Este artículo ha validado cuantitativamente la interpretación cualitativa de las tres narrativas propuestas, detallando estadísticamente la influencia de determinados factores explicativos en la distribución de los diferentes usos de suelo urbano y la red de transporte.

Entendiendo que el conjunto de factores que explican parte del crecimiento de un determinado uso varía en función de las características para ese mismo uso descritas en cada escenario, los resultados han demostrado estadísticamente que las narrativas que marcaban el comportamiento de los usos del suelo y el sistema de transporte durante el taller de cartografía colaborativa fueron tenidas en cuenta por los expertos, adecuándose al patrón espacial derivado del dinamismo urbano de la región que presenta cada escenario futuro (tabla 4). En términos generales, los factores derivados de la presente investigación han ofrecido un elevado grado de coincidencia tanto en los aspectos destacados de cada escenario, como en la información detallada de los expertos.

Por su parte, respecto a los factores identificados, los modelos locales RLGP constataron la existencia de variabilidad espacial en los factores que explican la localización de los crecimientos urbanos de acuerdo con los resultados del taller colaborativo. Observando los resultados es posible deducir que, de entre las variables físicas, la distancia a ríos y la altitud han sido relevantes en gran parte de los modelos estudiados, mientras que la variable pendiente no ha presentado tal relevancia a pesar de su aplicación en numerosos estudios (Barreira-González et al., 2017; Hu & Lo, 2007; Plata Rocha, Bosque Sendra, & Gómez Delgado, 2011). Por su parte, las variables relativas al transporte público y la movilidad (distancia a estaciones de tren y autobús interurbano)

presentan influencia en un mayor número de usos, dejando en un segundo plano la accesibilidad por carretera, a excepción de modelo que ajusta la distribución espacial del uso “residencial unifamiliar” en el escenario Altos niveles de inseguridad ciudadana y el uso “residencial multifamiliar” en el escenario Un corredor superpoblado. Tanto la accesibilidad por carretera como la distancia a carreteras principales (esta última excluida por la elevada correlación entre ambas), son factores críticos en la mayoría de los estudios enfocados a comprender el crecimiento urbano (Hamdy, Zhao, Osman, Salheen, & Eid, 2016; Li, Li, & Wu, 2018), sin embargo, en dos de los tres escenarios no representaron valores significativos. Puede deducirse al respecto que, tanto la presencia de espacios multifuncionales que reducen teóricamente las distancias, como las infraestructuras verdes que articulan el espacio, favorecen una movilidad netamente no motorizada, tal y como describen las narrativas de los escenarios, por lo que ambos factores no resultaron determinantes.

Respecto a la distancia a corredores verdes urbanos, es interesante remarcar su efecto sobre los escenarios Centros históricos no motorizados y Un corredor superpoblado. Cabe diferenciar dicho factor explicativo de los demás por su presencia relativa en ambos escenarios. Dichas infraestructuras verdes fueron proyectadas durante el taller de cartografía colaborativa, es decir, actualmente no se han planificado, pero su desarrollo se prevé para dos escenarios en el periodo 2018 – 2050. Ello implica que determinados elementos que puedan surgir a lo largo del periodo de tiempo seleccionado podrían afectar al estado final del uso en cuestión en la fecha límite prevista (2050). A este respecto, se deduce que las actividades participativas tienen un importante papel a la hora de determinar posibles elementos que han estructurado, estructuran o podrían estructurar el espacio en un horizonte futuro. Por otra parte, el análisis de investigaciones previas sobre la evolución urbana de la Comunidad Autónoma de Madrid (CAM) permitió contrastar los resultados obtenidos en relación con otros estudios. Así, Gallardo Beltrán (2014) en su selección de variables para explicar los cambios en los usos del suelo en tres escenarios diferentes con horizonte futuro 2025, incluye factores relacionados con los propios usos del suelo, socioeconómicos y biofísicos, donde fueron incorporadas entre 4 y 7 variables, dependiendo del escenario simulado. Se pueden observar numerosas coincidencias como la altitud, pendiente, distancia a ríos o accesibilidad respecto a los usos urbano e industrial-comercial, a pesar de la diferencia de escala entre estudios y de su aplicación a usos del suelo de carácter general, frente a los usos del suelo de carácter urbano tratados en la presente investigación. Por su parte, Díaz-Pacheco & Hewitt (2013) coinciden en la selección de diversos factores para evaluar la probabilidad de cambio de usos del suelo, donde la mayor diferencia se observa en la implementación de la densidad de población. En una escala más local, Barreira-González et al. (2017) aplica un modelo de regresión logística para calcular la aptitud de una parcela respecto a su transición al uso residencial o productivo en el periodo 2000 - 2010. En él se recogen variables como altitud, pendiente, hidrografía, espacios protegidos, usos del suelo, etc., gran parte de ellas coincidentes. Por último, variables como distancia a carreteras o distancia al uso comercial o industrial son utilizadas por Plata Rocha et al. (2011) con el objetivo de simular los usos de suelo urbano comercial, industrial y residencial para 2020. A pesar de la amplia literatura disponible, la complejidad de los sistemas urbanos dificulta la reflexión sobre cómo los factores explicativos influyen en su dinámica evolutiva. En cierta medida, dependiendo de la escala, la zona de estudio, la metodología aplicada o el enfoque al que se orientan los resultados, las variables a incluir pueden variar (Barreira-González et al., 2017), más aún si se aplican modelos enfocados a comprender fenómenos disruptivos proyectados mediante escenarios futuros.

En lo que respecta al análisis de los resultados, analizando en profundidad los modelos RLGP obtenidos, estos muestran un ajuste elevado (tabla 6), revelando su adecuación para mejorar la comprensión de los procesos de expansión urbana reproducidos en el taller. No obstante, otros factores que podrían ser determinantes no han sido tenidos en cuenta en los modelos, como variables socioeconómicas, biofísicas, demográficas, etc., u otras difíciles de cuantificar o

representar espacialmente (como por ejemplo decisiones políticas en cuanto a legislación urbanística o el propio comportamiento de la población), que influyen en la explicación del crecimiento urbano (Cantergiani & Gómez Delgado, 2020; Plata Rocha et al., 2011). En este sentido, está delimitada selección de variables se justifica en el contexto del taller de cartografía colaborativa, donde los factores explicativos intentaron ajustarse a los elementos presentados en la cartografía disponibles para los expertos. Por otro lado, como ha ocurrido en la presente investigación y al igual que en otros estudios (Guanglong et al., 2017; Luo & Wei, 2009; Plata Rocha et al., 2011; Shafizadeh-Moghadam & Helbich, 2015), numerosas variables explicativas que podrían haber sido determinantes en la explicación del fenómeno de expansión urbana no han podido ser utilizadas debido a la disponibilidad en una escala no adecuada a la utilizada en el estudio (Gallardo Beltrán, 2014) o a la presencia de multicolinealidad y autocorrelación espacial, evitando así una redundancia en la información del modelo en cuestión (Plata Rocha, Bosque Sendra, et al., 2011).

Respecto al cálculo de aptitud o idoneidad en modelos de simulación urbana, concretamente aquellos basados en AC, la regresión logística ha sido ampliamente utilizada por su carácter empírico y su complementariedad con otras herramientas (Liao et al., 2016). Por el contrario, la aplicación de modelos de ponderación geográfica aún se encuentra poco extendida, a pesar de ofrecer una mejora en el desempeño de las simulaciones al aplicar RLGP a la definición de las reglas de transición (Mirbagheri & Alimohammadi, 2017).

Finalmente, en relación con el análisis de los residuos derivados de la calibración del modelo, para poder evaluar en profundidad dicha información es necesario partir de la hipótesis nula, donde se expone la existencia de una diferencia estadísticamente significativa entre el valor observado y el valor esperado si el atributo que se analiza está distribuido de forma aleatoria entre las entidades del caso de estudio. A pesar de que los valores residuales observados demuestran que la correlación espacial es muy baja, el p-value presenta cierta significancia en los modelos, lo que indica que los conjuntos de datos presentan cierta agrupación espacial, posiblemente debido a la presencia de crecimientos compactos que han dificultado la creación de un marco de datos homogéneo en el espacio. En determinadas ocasiones, el grado de correlación de los residuos puede venir dado por la localización absoluta de los datos muestrales, así como la distancia entre sus localizaciones (Fotheringham et al., 2002). Por consiguiente, la distribución de la variable dependiente (y) no permitió obtener un conjunto perfectamente equilibrado. Este hecho demuestra una de las dificultades que afrontan los estudios urbanos a escala local, donde la distribución de usos en el espacio presenta una elevada complejidad.

5. CONCLUSIONES

En el contexto de la planificación de escenarios futuros, la combinación de metodologías de análisis estadístico y técnicas de comunicación participativas pueden aportar un doble criterio. Por una parte, se justifica la información derivada del taller de cartografía colaborativa por su carácter experimental y observacional y, por otra, esta investigación demuestra la validez de dichos resultados a través de métodos estadísticos. Por lo tanto, el modelo RLGP fue la metodología escogida para determinar estadísticamente qué factores explicativos influyeron en el proceso de distribución espacial de los usos del suelo urbano y el transporte para cada escenario futuro descrito. De esta manera, aprovechando su aplicación para estudiar relaciones no estacionarias entre las variables, se logró un mayor detalle de la información extraída de los datos espaciales.

En este sentido, la aplicación de RLGP a escenarios futuros ha sido una importante contribución para este estudio al reorientar la utilidad de esta herramienta hacia el análisis de un fenómeno con

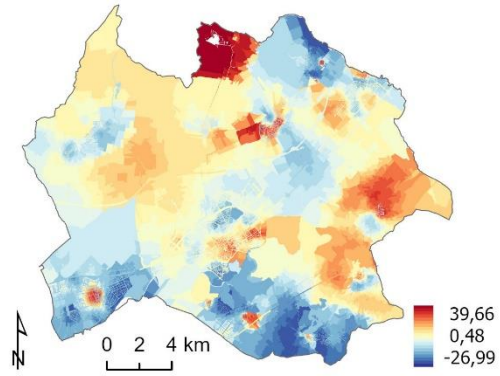
un horizonte a largo plazo. Hasta ahora, solo se había aplicado al presente inmediato basado en información del pasado. Este nuevo enfoque aporta información de gran valor si se persigue una planificación proactiva, especialmente aquella donde los agentes involucrados en la toma de decisiones y los planificadores urbanos requieren información más precisa para la aplicación de instrumentos de planificación.

En cuanto al apartado metodológico de la investigación, aunque los resultados muestran un elevado ajuste del modelo local en la explicación del fenómeno de expansión urbana para los distintos usos, es importante tener en cuenta diversos aspectos que dificultan la implementación de RLGP. El proceso de selección de variables independientes es esencial para una correcta predicción, más aún cuando estas intentan explicar un fenómeno en un horizonte futuro. Del mismo modo, la muestra obtenida de la variable dependiente debe ofrecer una distribución espacial y una cantidad significativas para evitar errores durante el desarrollo del modelo. En definitiva, para adaptarse a las observaciones extraídas, se requiere una minuciosa interpretación de los resultados, siempre expresada desde el contexto que ofrece el conjunto de datos de partida.

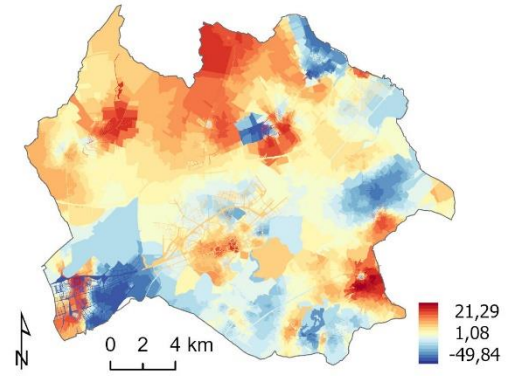
Para investigaciones futuras, la aplicación de la metodología propuesta proporcionaría un mayor grado de detalle si el parcelario rústico presentara una subdivisión que ofrezca más realismo en cuanto a las parcelas urbanas. De este modo, las posteriores tareas del presente proyecto enfocadas a simular el crecimiento urbano mediante el desarrollo de un modelo basado en AC irregulares lograrían configurar con elevada exactitud y precisión las reglas de transición que determinan los valores de vecindad, accesibilidad y adecuación espacial.

ANEXO I. COEFICIENTES DE REGRESIÓN LOCALES (RESIDENCIAL UNIFAMILIAR ESC. 2)

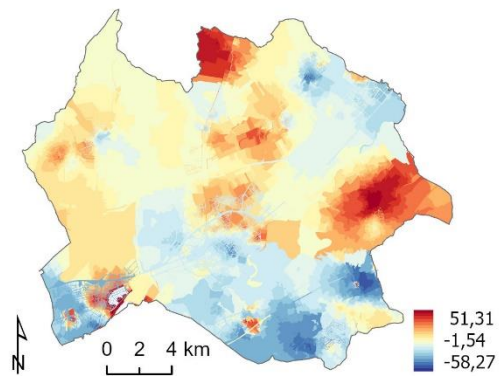
Coefficientes locales β (Dist. a paradas de autobús)



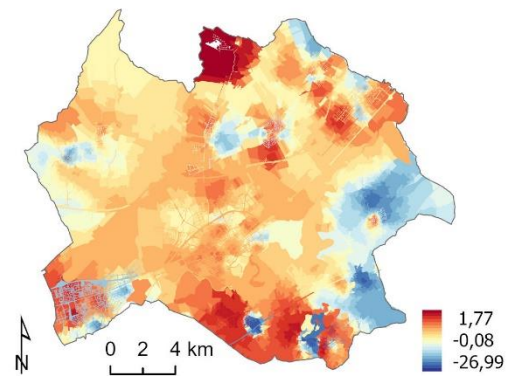
Coefficientes locales β (Dist. a estaciones de tren)



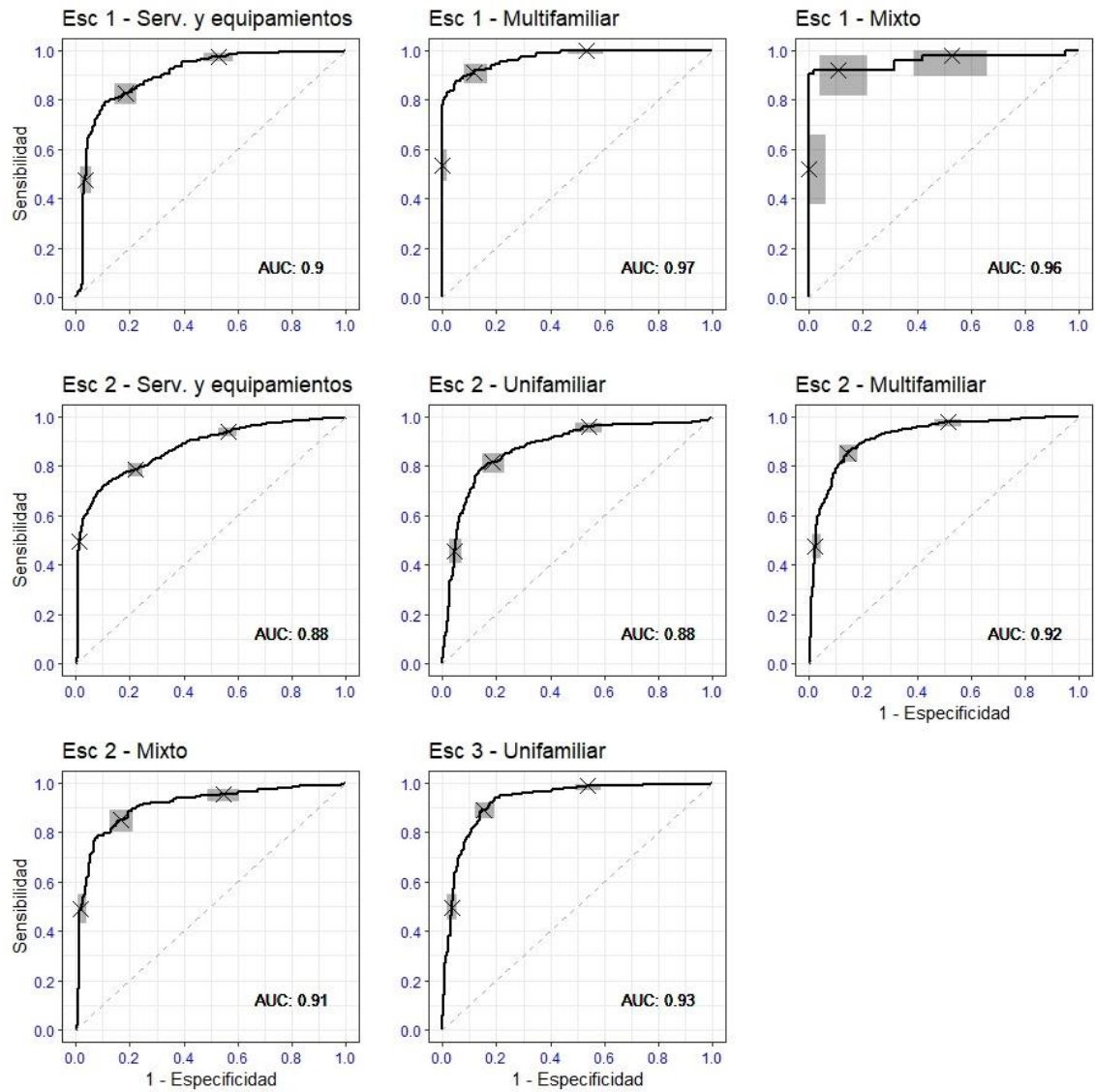
Coefficientes locales β (Dist. a uso unifamiliar)



Coefficientes locales β (Dist. a corredores verdes)



ANEXO II. CURVAS ROC



*Las zonas sombreadas representan las regiones de confianza (nivel de significación 0.05) para los puntos de la curva ROC usando el método exacto de Clopper y Pearson (1934), recogido en la librería plotROC.

REFERENCIAS

- Akaike, H. (1973) Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle. In: Petrov, B.N. and Csaki, F., Eds., *International Symposium on Information Theory*, 267-281.
- Avin, U., & Goodspeed, R. (2020). Using Exploratory Scenarios in Planning Practice: A Spectrum of Approaches. *Journal of the American Planning Association*, 0(0), 1–14. <https://doi.org/10.1080/01944363.2020.1746688>
- Barreira-González, P., Aguilera-Benavente, F., & Gómez-Delgado, M. (2017). Implementation and calibration of a new irregular cellular automata-based model for local urban growth simulation: The MUGICA model. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 46(2), 243–263. <https://doi.org/10.1177/2399808317709280>
- Barreira-González, P., Gómez-Delgado, M., & Aguilera-Benavente, F. (2015). From raster to vector cellular automata models: A new approach to simulate urban growth with the help of graph theory. *Computers, Environment and Urban Systems*, 54, 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.07.004>
- Bharath, H. A., Chandan, M. C., Vinay, S., & Ramachandra, T. V. (2018). Modelling urban dynamics in rapidly urbanising Indian cities. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 21(3), 201–210. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.08.002>
- Börjeson, L., Höjer, M., Dreborg, K. H., Ekvall, T., & Finnveden, G. (2006). Scenario types and techniques: Towards a user's guide. *Futures*, 38(7), 723–739. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2005.12.002>
- Brunsdon, C., Fotheringham, A. S., & Charlton, M. E. (1996). Geographically Weighted Regression: A Method for Exploring Spatial Nonstationarity. *Geographical Analysis*, 28(4), 281–298.
- Cantergiani, C., & Gómez Delgado, M. (2020). Simulación del crecimiento urbano con AMEBA: Modelo Basado en Agentes para la ocupación residencial. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, (86). <https://doi.org/10.21138/bage.2910>
- Chen, J. (2007). Rapid urbanization in China: A real challenge to soil protection and food security. *CATENA*, 69(1), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.04.019>
- Chotchaiwong, & Wijitkosum. (2019). Predicting Urban Expansion and Urban Land Use Changes in Nakhon Ratchasima City Using A CA-Markov Model under Two Different Scenarios. *Land*, 8(9), 140. <https://doi.org/10.3390/land8090140>
- Clopper, C. J., & Pearson, E. S. (1934). The Use of Confidence or Fiducial Limits Illustrated in the Case of the Binomial. *Biometrika*, 26(4), 404. <https://doi.org/10.2307/2331986>
- Dadashpoor, H., Azizi, P., & Moghadasi, M. (2019). Analyzing spatial patterns, driving forces and predicting future growth scenarios for supporting sustainable urban growth: Evidence from Tabriz metropolitan area, Iran. *Sustainable Cities and Society*, 47, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101502>
- Deal, B., Pan, H., Timm, S., & Pallathucheril, V. (2017). The role of multidirectional temporal analysis in scenario planning exercises and Planning Support Systems. *Computers, Environment and Urban Systems*, 64, 91–102. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.01.004>
- Díaz-Pacheco, J., & Hewitt, R. (2013). Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software. *GeoFocus*, 14, 1–22. Recuperado de <http://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/298>

- Duque, J. C., Velásquez, H., & Agudelo, J. (2011). Infraestructura pública y precios de vivienda: una aplicación de regresión geográficamente ponderada en el contexto de precios hedónicos. *Ecós de ECONOMÍA*, (33), 95–122.
- Fotheringham, A. S., Brunson, C., & Charlton, M. (2002). Geographically weighted regression. The analysis of spatially varying relationships (J. W. & S. Ltd, Ed.). West Sussex: JOHN WILEY & SONS, LTD.
- Gallardo Beltrán, M. (2014). Cambios de usos del suelo y simulación de escenarios en la Comunidad de Madrid. Universidad Complutense de Madrid.
- Gao, J., & Li, S. (2011). Detecting spatially non-stationary and scale-dependent relationships between urban landscape fragmentation and related factors using Geographically Weighted Regression. *Applied Geography*, 31(1), 292–302. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.06.003>
- García Rodríguez, M. P., & Pérez González, M. E. (2014). Análisis multitemporal del urbanismo expansivo en el corredor del Henares. Aportación de las imágenes de satélite. *Estudios Geográficos*, 75(277), 597–618. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201419>
- Gollini, I., Lu, B., Charlton, M., Brunson, C., & Harris, P. (2015). GWmodel : an R package for exploring spatial heterogeneity. *Journal of Statistical Software*, 63(17), 1–50. <https://doi.org/10.1080/10095020.2014.917453>
- Guanglong, D., Erqi, X., & Hongqi, Z. (2017). Urban Expansion and Spatiotemporal Relationships with Driving Factors Revealed by Geographically Weighted Logistic Regression. *Journal of Resources and Ecology*, 8(3), 277–286. <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2017.03.008>
- Gutierrez-Puebla, J., García-Palomares, J. C., & Daniel-Cardozo, O. (2012). Regresión Geográficamente Ponderada (GWR) y estimación de la demanda de las estaciones del Metro de Madrid. XV Congreso Nacional de Tecnologías de La Información Geográfica, 1–13. Retrieved from http://www.age-geografia.es/tig/2012_Madrid/ponencia2/GutierrezPuebla_final_par.pdf
- Hamdy, O., Zhao, S., Osman, T., Salheen, M., & Eid, Y. (2016). Applying a Hybrid Model of Markov Chain and Logistic Regression to Identify Future Urban Sprawl in Abouelreesh, Aswan: A Case Study. *Geosciences*, 6(4), 43. <https://doi.org/10.3390/geosciences6040043>
- Hou, H., Wang, R., & Murayama, Y. (2019). Scenario-based modelling for urban sustainability focusing on changes in cropland under rapid urbanization: A case study of Hangzhou from 1990 to 2035. *Science of The Total Environment*, 661, 422–431. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.208>
- Hu, Z., & Lo, C. P. (2007). Modeling urban growth in Atlanta using logistic regression. *Computers, Environment and Urban Systems*, 31(6), 667–688. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2006.11.001>
- Hurvich, C. M., & Tsai, C. L. (1989). Regression and time series model selection in small samples. *Biometrika*, 76(2), 297–307. <https://doi.org/10.1093/biomet/76.2.297>
- Jokar Arsanjani, J., Helbich, M., Kainz, W., & Darvishi Bolorani, A. (2013). Integration of logistic regression, Markov chain and cellular automata models to simulate urban expansion. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 265–275. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.12.014>
- Li, C., Li, J., & Wu, J. (2018). What drives urban growth in China? A multi-scale comparative analysis. *Applied Geography*, 98(June), 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.07.002>

- Liao, J., Tang, L., Shao, G., Su, X., Chen, D., & Xu, T. (2016). Incorporation of extended neighborhood mechanisms and its impact on urban land-use cellular automata simulations. *Environmental Modelling and Software*, 75, 163–175. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.10.014>
- Luo, J., & Wei, Y. H. D. (2009). Modeling spatial variations of urban growth patterns in Chinese cities: The case of Nanjing. *Landscape and Urban Planning*, 91(2), 51–64. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.11.010>
- Mas, J.-F., Soares Filho, B., Pontius, R., Farfán Gutiérrez, M., & Rodrigues, H. (2013). A Suite of Tools for ROC Analysis of Spatial Models. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2(3), 869–887. <https://doi.org/10.3390/ijgi2030869>
- Matthews, S. A., & Yang, T.-C. (2012). Mapping the results of local statistics. *Demographic Research*, 26, 151–166. <https://doi.org/10.4054/demres.2012.26.6>
- Mirbagheri, B., & Alimohammadi, A. (2017). Improving urban cellular automata performance by integrating global and geographically weighted logistic regression models. *Transactions in GIS*, 21(6), 1280–1297. <https://doi.org/10.1111/tgis.12278>
- Mondal, B., Das, D. N., & Dolui, G. (2015). Modeling spatial variation of explanatory factors of urban expansion of Kolkata: a geographically weighted regression approach. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1(4), 29. <https://doi.org/10.1007/s40808-015-0026-1>
- Nkeki, F. N., & Asikhia, M. O. (2019). Geographically weighted logistic regression approach to explore the spatial variability in travel behaviour and built environment interactions: Accounting simultaneously for demographic and socioeconomic characteristics. *Applied Geography*, 108, 47–63. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2019.05.008>
- Olazabal, E., & Bellet, C. (2019). De la ciudad compacta a la ciudad extensa. Procesos de urbanización recientes en áreas urbanas españolas articuladas por ciudades medias. *Anales de Geografía de La Universidad Complutense*, 39(1), 149–175. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5209/AGUC.64681>
- Pascual Rosa, V., Aguilera-Benavente, F., & Salado García, M. J. (2019). Clasificación y análisis de los procesos de cambio en la forma urbana de las áreas metropolitanas españolas: aplicación de métricas espaciales. *Estudios Geográficos*, 80(286), e006. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201926.006>
- Perveen, S., Kamruzzaman, M., & Yigitcanlar, T. (2017). Developing policy scenarios for sustainable urban growth management: A Delphi approach. *Sustainability*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/su9101787>
- Pineda Jaimes, N. B., Bosque Sendra, J., Gómez Delgado, M., & Franco Plata, R. (2010). Exploring the driving forces behind deforestation in the state of Mexico (Mexico) using geographically weighted regression. *Applied Geography*, 30(4), 576–591. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.05.004>
- Plata Rocha, W., Bosque Sendra, J., & Gómez Delgado, M. (2011). Análisis de factores explicativos del crecimiento urbano en la Comunidad de Madrid a través de métodos estadísticos y SIG. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG)*, 3(I), 201–230.
- Plata Rocha, W., Gómez-Delgado, M., & Bosque-Sendra, J. (2011). Simulating urban growth scenarios using GIS and multicriteria analysis techniques: A case study of the Madrid region, Spain. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 38(6), 1012–1031. <https://doi.org/10.1068/b37061>

- Radinsky, J., Milz, D., Zellner, M., Pudlock, K., Witek, C., Hoch, C., & Lyons, L. (2017). How planners and stakeholders learn with visualization tools: using learning sciences methods to examine planning processes. *Journal of Environmental Planning and Management*, 60(7), 1296–1323. <https://doi.org/10.1080/09640568.2016.1221795>
- Rodrigues, M., de la Riva, J., & Fotheringham, S. (2014). Modeling the spatial variation of the explanatory factors of human-caused wildfires in Spain using geographically weighted logistic regression. *Applied Geography*, 48, 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.01.011>
- Shafizadeh-Moghadam, H. (2019). Improving spatial accuracy of urban growth simulation models using ensemble forecasting approaches. *Computers, Environment and Urban Systems*, 76, 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2019.04.005>
- Shafizadeh-Moghadam, H., & Helbich, M. (2015). Spatiotemporal variability of urban growth factors: A global and local perspective on the megacity of Mumbai. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 35, 187–198. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.08.013>
- Ustaoglu, E., Williams, B., & Petrov, L. O. (2017). Scenario analysis of alternative land development patterns for the Leipzig-Halle region: Implications for transport-land-use sustainability. *Urban Planning*, 2(1), 108–129. <https://doi.org/10.17645/up.v2i1.838>
- van der Heijden, K. (2000). Scenarios and Forecasting. *Technological Forecasting and Social Change*, 65(1), 31–36. [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(99\)00121-3](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(99)00121-3)
- Wheeler, D., & Tiefelsdorf, M. (2005). Multicollinearity and correlation among local regression coefficients in geographically weighted regression. *Journal of Geographical Systems*, 7(2), 161–187. <https://doi.org/10.1007/s10109-005-0155-6>
- Zapata, M. A., & Kaza, N. (2015). Radical uncertainty: scenario planning for futures. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 42(4), 754–770. <https://doi.org/10.1068/b39059>

4.3. SIMULACIÓN PROSPECTIVA DE ESCENARIOS FUTUROS DISRUPTIVOS

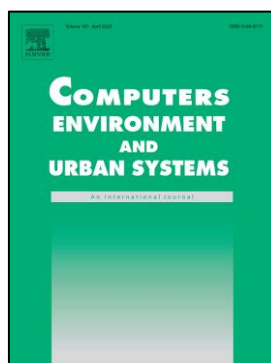
RESUMEN

El desarrollo urbano es un proceso que, a medida que evolucionan las ciudades, se vuelve cada vez más complejo y en el que pueden producirse acontecimientos inesperados que alteren la tendencia prevista a lo largo del tiempo. Para anticiparse y examinar las posibles consecuencias territoriales ante la aparición repentina de procesos difíciles de predecir en plazos futuros a largo plazo, se necesitan metodologías prospectivas que permitan gestionar y aplicar escenarios disruptivos en la planificación de escenarios futuros. En esta investigación se ha desarrollado un método que combina Autómatas Celulares vectoriales (LP-CA) y los enfoques participativos con el fin de generar trayectorias de uso del suelo que sean espacialmente coherentes con los escenarios disruptivos. El corredor urbano-industrial del Henares (España), que ha experimentado importantes transformaciones urbanas en las últimas décadas, fue elegido caso de estudio para probar el modelo. En una validación preliminar del modelo LP-CA, un valor de Figure of Merit (FOM) de 0,2817 indicó un rendimiento satisfactorio. Los resultados demostraron la utilidad de la construcción participativa de escenarios y del taller para apoyar la configuración de los parámetros del modelo y la representación espacial de dinámicas urbanas complejas. En conclusión, esta metodología puede utilizarse para generar simulaciones de cambios en el uso del suelo urbano en escenarios futuros disruptivos y para observar espacialmente la propagación de la incertidumbre asociada a los eventos futuros a través de diferentes usos del suelo urbano.

PALABRAS CLAVE

LP-CA; escenarios disruptivos; participación, usos del suelo urbano, simulación.

Molinero-Parejo, R., Aguilera-Benavente, F., Gómez-Delgado, M., & Shurupov, N. (2023). *Combining a land parcel cellular automata (LP-CA) model with participatory approaches in the simulation of disruptive future scenarios of urban land use change.* Computers, Environment and Urban Systems, 99. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2022.101895>



Revista	Computer, Environment and Urban System
Editorial	ELSEVIER
Tipo	Open Access / Suscripción
Categorías relacionadas	Geografía; Planificación urbana y regional
Cuartil JIF (2021)	Q1
Factor de impacto (5 años)	6,466

COMBINING A LAND PARCEL CELLULAR AUTOMATA (LP-CA) MODEL WITH PARTICIPATORY APPROACHES IN THE SIMULATION OF DISRUPTIVE FUTURE SCENARIOS OF URBAN LAND USE CHANGE

1. INTRODUCTION

Cities are becoming increasingly more complex. As they evolve, the interactions between their constituent parts increase (Batty, 2020), which makes it even more difficult for researchers to study them. This complexity is further accentuated by uncertainty, due to the impossibility of understanding and quantifying all the exogenous factors that influence urbanisation processes (Mustafa et al., 2015).

In order to face a complex and uncertain future, scenario planning emerges as an alternative that provides a wider range of expectations about the future, identifying possible directions to achieve a more suitable framework for consistent decision-making (Lyons & Davidson, 2016; Peterson et al., 2003; Zapata & Kaza, 2015). However, the effectiveness of scenario planning may be limited if all the scenarios remain very close to the business-as-usual (BAU) projection. Unexpected events such as the housing bubble crisis in Spain (Burriel, 2011), the migration crisis in Europe (Hampshire, 2015), the SARS-CoV-2 pandemic (Antipova, 2021) or the recent Ukrainian war undermine linear planning and are difficult to envisage without imaginative and flexible future scenarios (Houet et al., 2016). This means that for the best possible management of (un)desired future urban developments, disruptive thinking must be part of the envisioning process, so breaking with the linearity of current events to encompass the unexpected (Soria-Lara et al., 2021).

As part of the urban planning process, urban simulation models attempt to represent the future development of cities to ensure that they can develop in a reasonable planned way. Of these, Cellular Automata (CA) models are the most commonly used in support of urban management, especially in local or regional studies (Aburas et al., 2016; Santé et al., 2010; Triantakoustantis & Mountrakis, 2012). In particular, irregular CA models have emerged in a context of urban land use change at a local scale (Benenson & Torrens, 2004; O'Sullivan, 2001; Pinto & Antunes, 2010; Stevens & Dragičević, 2007). Most of these models focus on simulating urban growth using land parcels as the best base unit for their analysis (Abolhasani et al., 2016; Barreira-González et al., 2019; Barreira-González et al., 2015; Stevens et al., 2007; Yao et al., 2017; Zhai et al., 2020). However, it is difficult for these models to consider the wide range of factors involved in the future evolution of urban areas by themselves, especially when imaginative, disruptive scenarios are depicted. Many parameters implemented in CA models require critical and social thinking in order for them to be successfully adapted into future simulation. With this in mind, an increasing number of studies are linking narratives with modelling tasks in a participatory way, so as to obtain better, more realistic results (Hewitt et al., 2014; Houet et al., 2016; Kok & van Delden, 2009, 2013).

This paper takes the intimately coupled narratives & models' approach, a combination of the model-based approach and the narrative-based approach (Houet et al., 2016). It is well-adapted to enable the active participation of stakeholders and facilitates the integration of both qualitative and quantitative information when linking narrative storylines with urban land use models (Houet et al., 2016). This combined approach, integrated into participatory scenario planning, involves three key steps mentioned below:

- Create a narrative storyline by engaging researchers and citizens, contributing ideas from a wide range of imaginative futures (including disruptive ones).

- Work on the narratives in a participatory workshop involving experts and stakeholders to transform qualitative insights into input for the model.
- Provide a map of future urban land uses in such a way as to enhance the value of the narrative storyline itself.

The aim of this research is to propose an integrated methodology to simulate imaginative, disruptive scenarios by combining land use modelling techniques with participatory approaches. This methodology implies the use of a new Land Parcel Cellular Automata (LP-CA) model which uses well-defined boundaries and real dimensions of land parcels to make the mapped scenarios more easily understandable for the actors involved in the participatory scenario planning process. We believe this integrated approach will be helpful to support the simulation of multiple, structurally distinct futures and to reproduce complex urban dynamics, such as land use conversion and abandonment included in disruptive narrative storylines. The proposed methodology has already been tested on a dynamic urban-industrial corridor in the Madrid Metropolitan Area (Spain).

This paper is divided into seven sections. After this introduction, the concept of disruptive scenarios and their usefulness in future simulation is explored. This is followed by a description of the study area. The next section sets out the methodology, introducing the LP-CA model and assessing its performance. The participatory process of scenario building is then explained together with its link to modelling tasks, and the section concludes with a partial validation of the future scenario. This is followed by the results and the discussion. The paper ends with brief concluding remarks and suggestions as to possible future lines of research.

2. DISRUPTIVE SCENARIOS TO FACE THE FUTURE

The disruptive concept is an increasingly important feature of research into future scenarios. Christensen (1997) employs the term disruptive to indicate a change in a pre-existing trend due to innovation. Millar, Lockett, & Ladd (2018) define disruptive change as sudden change that renders the processes that preceded the change invalid as bases for predictive models. Within the urban planning context, disruptive is used to refer to possible events that can positively or negatively affect the dynamics of the city (Molinero-Parejo et al., 2021). Unexpected disruptive events can sometimes alter the path outlined by urban plans and, even if they have a contingency plan, they may not be prepared for disruptive changes. Urban planners and decision-makers must therefore expand the range of possible future scenarios envisaged in their plans.

To simulate disruptive scenarios, it is crucial to engage citizens, experts and stakeholders in city planning during the visioning step as they can add to the process outside the box thinking (Soria-Lara et al., 2021) and help to generate disruptive narratives. It is also necessary to redevelop simulation models to enable them to complement the maps of future urban land uses changes in line with the disruptive narrative storylines, where new urban processes and patterns may emerge. Although previous researchers have simulated off-trend scenarios (crisis, innovation, sustainability, etc.) (Domingo et al., 2021; Kok & van Delden, 2009; Plata Rocha et al., 2011; Vaz et al., 2012), there is still a lot of work to do, since most of the scenarios simulated using CA models cannot be considered disruptive in the terms evaluated by Soria-Lara et al. (2021), as they have not been generated through barely imaginable (but plausible) processes (see Table 1). The keywords “as usual”, “baseline”, “trend” or “natural” are used in Table 1 to refer to traditional thinking in scenario planning.

Table 1. Urban scenarios simulated by CA models.

Author(s)	Purpose	Scenarios
(Yang et al., 2019)	Modelling urban expansion	<ul style="list-style-type: none"> • Sustainable development • Dynamics as usual • Fragmented development • Unequal development • Conventional development
(Liu et al., 2017)	Simulating multiple land use scenarios	<ul style="list-style-type: none"> • Baseline development • Fast development • Slow development • Harmonious development
(Vaz et al., 2012)	Forecast of urban change	<ul style="list-style-type: none"> • Ecological interest • Business as usual • Economic interest
(Feng et al., 2018)	Urban growth modelling and future scenario projection	<ul style="list-style-type: none"> • Business as usual • COUNTY-dominated • ROAD-dominated • POP-dominated
(Zhou et al., 2020)	Multi-scenario simulation of urban land change	<ul style="list-style-type: none"> • Natural development • Planning constraint
(Yao et al., 2017)	Simulating urban land-use changes	<ul style="list-style-type: none"> • Disorganized urban development with no restrictions • Sustainable urban development with ecology control • Sustainable urban development with ecology control and “job-housing balance”
(Jia et al., 2020)	Urban modelling for streets	<ul style="list-style-type: none"> • Trend development • CBD-based development • TOD promotion
(Chen et al., 2017)	Urban growth simulation	<ul style="list-style-type: none"> • Business-as-usual

Many of these scenarios fall within a narrow divergence range within the BAU zone (Figure 1). This limits the ability of the integrated scenario-model approach to simulate unexpected events, such as gentrification or the abandonment of certain areas. In Western Europe, many city centres have undergone transformations from predominantly commercial and industrial uses to residential housing (Hamnett & Whitelegg, 2007). A reverse, but more recent process, is the adaptative reuse of old residential buildings as office buildings (Rodrigues & Freire, 2017). In the same way, urban regeneration necessarily involves the possibility of properties being used for new purposes. The renovation of abandoned buildings in city centres often involves a change of use (Lami, 2020), for example, from residential to commercial use. Another disruptive urban process that has affected many European cities in the last decade is urban shrinkage (Haase et al., 2016). As previously stated, models should re-adapt to simulate the abovementioned processes, after which the integrated use of disruptive scenarios and LP-CA models - the objective of this research - could help create more resilient plans to deal with disruptive changes (Laird, 2014).

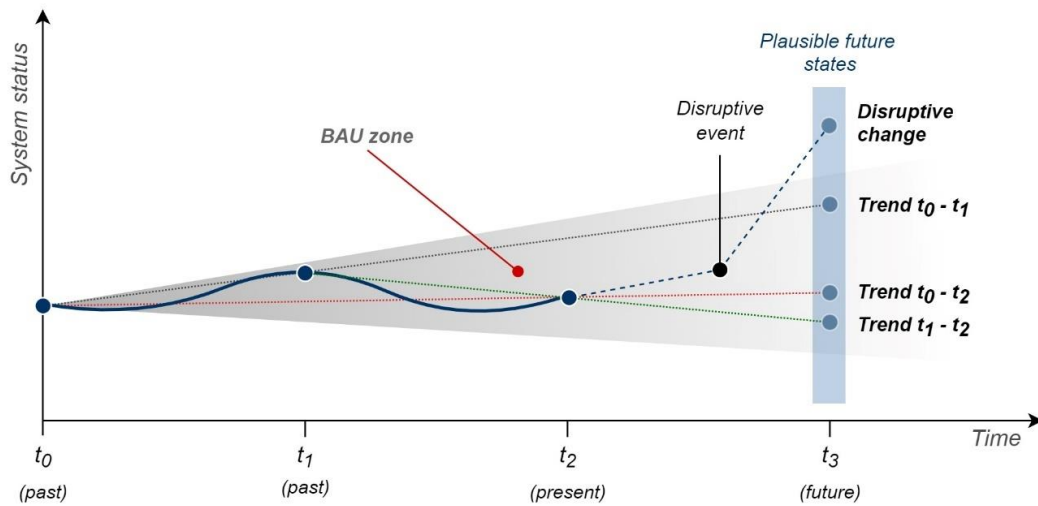


Figure 1. Conceptual diagram of changes in scenario planning due to disruptive events that cause an abrupt divergence in the envisaged trend.

3. STUDY AREA AND DATA

As a study area for this research, we focused on part of the Henares Corridor, Madrid - Guadalajara (Spain) (Figure 2). The study area covers several municipalities with a total population of 419,791 inhabitants (National Statistics Institute, 2018). It is characterised by small and medium-sized towns with significant industrial fabric and a variety of territorial and social dynamics (Barreira-González et al., 2019; Cantergiani & Gómez Delgado, 2020).

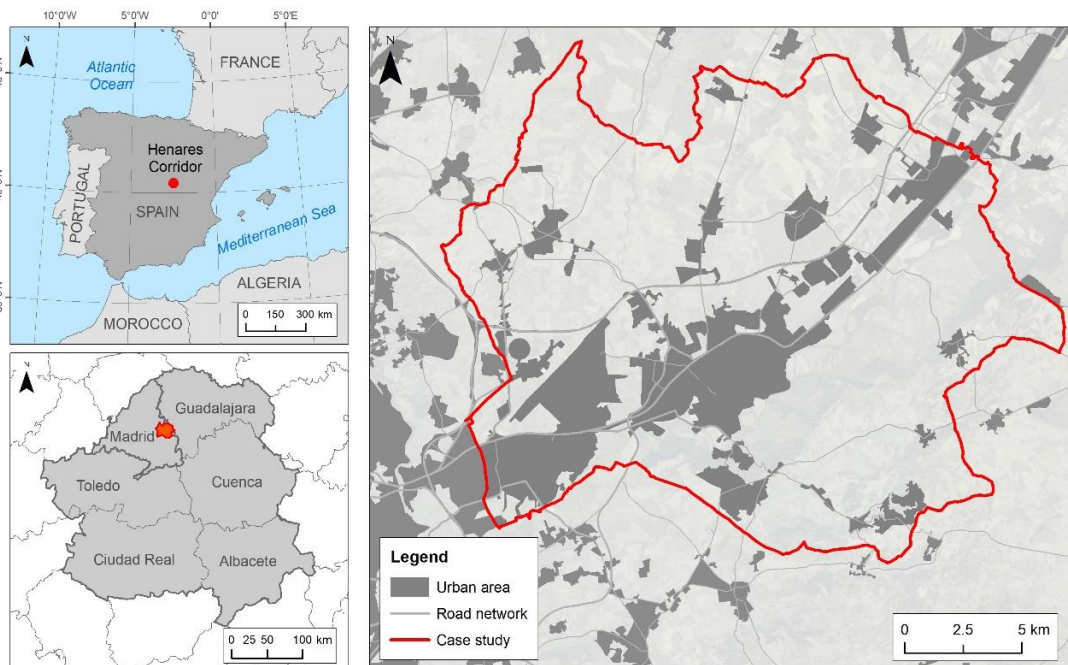


Figure 2. Study area.

As regards the input data, cadastral parcels were obtained from the General Directorate of the Cadastre of Spain (<https://www.sedecatastro.gob.es/>). These parcels were then classified into 5 active urban land use categories: (1) commercial and utilities, (2) industrial, (3) single-family residential, (4) multi-family residential, and (5) mixed (residential and commercial), obtaining the 2018 reference map. For the calibration, simulation, and validation of the LP-CA model, reference maps were generated for 1986 and 2002 from the development date of the land parcels.

According to these historical data, annual area growth and the cumulative area growth in these land uses in the study area were analysed (Figure 3) and significant fluctuations of varying intensity were identified. These involved a marked increase or decrease in the built-up area due to disruptive events. For example, sharp changes can be observed in the early 1970s and 2000s, especially due to new urban developments (single-family residential growth starting in 1990) and the slowdown in the development of new industrial areas due to the oil crisis (early 1970s). The impact of the global economic crisis of 2008 can also be observed, as the upward curve flattens out.

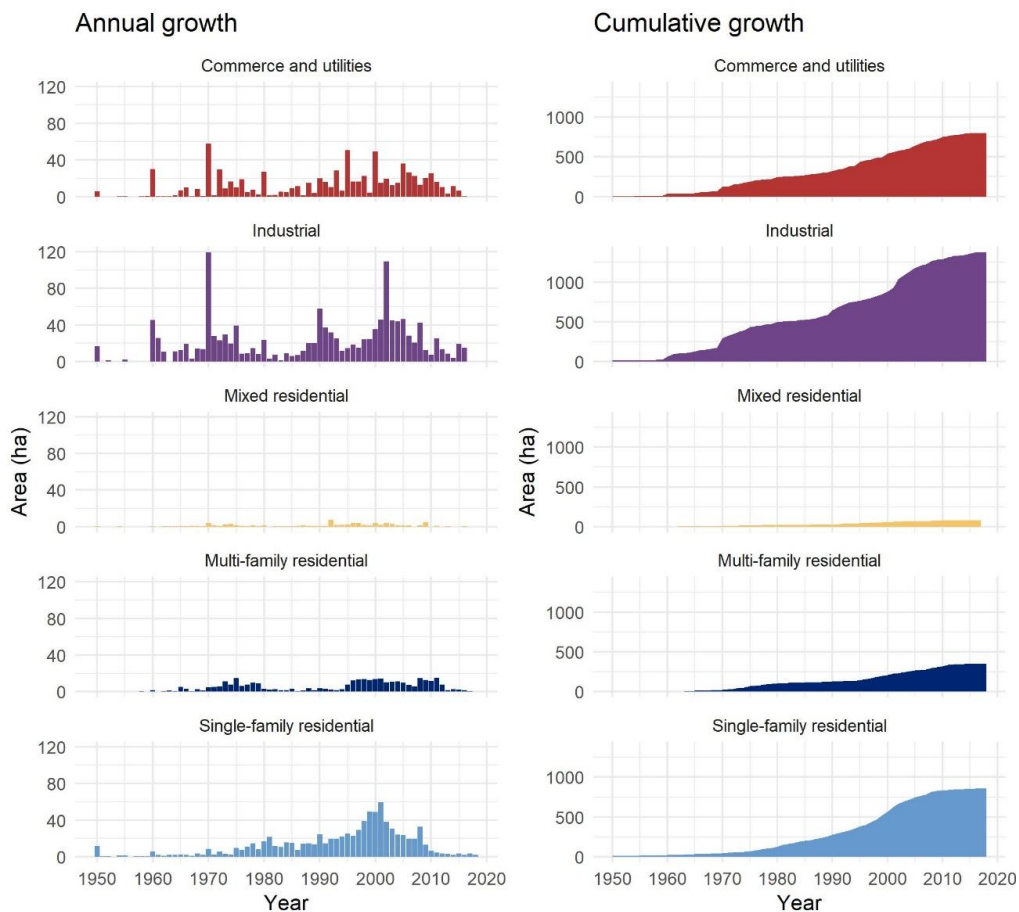


Figure 3. Annual and cumulative growth in the five urban land uses in the study area.

4. METHODOLOGY

The methodology is divided into five sections. In the first section, the LP-CA model is introduced, and the parameters are described, as is the calculation of the transition potential. This is followed by an explanation of the process of evaluation of the LP-CA model and the metrics applied in the

validation of its overall performance. Next, the scenario building process based on participatory approaches is explained. The fourth section presents new advances in the adaptation of the LP-CA model in combination with participatory approaches to simulate disruptive scenarios, while in the final part, the validation of the results of simulating future scenarios is described.

4.1. THE LP-CA MODEL

This study applied a LP-CA model derived from well-established models based on the work of White et al. (1997), which had been adapted to an irregular parcel environment (Barreira-González et al., 2015; Chen et al., 2017). The transition potential of a land parcel to change its current state is primarily determined by a combination of several factors. The probabilistic formula is represented in Equation 1 as follows:

$$P_{i,k}^t = v \cdot A_i \cdot S_{i,k} \cdot Z_i \cdot N_{i,k,d}^t \quad (1)$$

where $P_{i,k}^t$ is the potential for parcel i to undergo a transition to an urban land use k in a time t , v is the stochastic perturbation term, A_i is the accessibility in parcel i , $S_{i,k}$ is the suitability in parcel i for land use k , Z_i is the zoning in parcel i and $N_{i,k,d}^t$ is the neighbourhood effect between parcel i for urban land use k within a time t and the adjacent parcels within a buffer at a distance d .

Stochastic perturbation. The real world is full of human decisions and actions that are difficult to quantify by deterministic models since many of them exhibit a certain degree of randomness. With this assumption in mind, stochastic perturbation was introduced into the calculation of transition potential (White & Engelen, 1993). This factor is computed using Equation 2:

$$v = 1 + (-\ln(rand))^\alpha \quad (2)$$

where $rand$ is a random number ($0 < rand < 1$) and α is a number ($0 < \alpha < 1$) that controls the size of the disturbance. As White & Engelen (1993) points out, a low α value implies simpler and more compact growth forms, while a high α value reports a more random structure of the city, higher fragmentation, and higher entropy.

Accessibility. This is defined as the ease with which people can travel to a desired location, usually for leisure, study, or work purposes. This parameter is assessed by measuring the distance from the centroid of each parcel to the nearest edge of the road network (streets, roads, highways, and toll roads).

Suitability. This study adopted Geographically Weighted Logistic Regression (GWLR) to obtain the development suitability for each urban land use on each parcel (Molinero-Parejo, Aguilera-Benavente, & Gómez-Delgado, 2021). This method is a modified GWR in its logistic version, adapted for its application with binary dependent variables (urban - nonurban). Mirbagheri & Alimohammadi (2017) showed that GWLR improves simulation performance in urban CA. In short, it allows us to investigate spatial variations in regression coefficients and the spatial, non-stationary relationships that are not visible in global models (Fotheringham et al., 2002). The suitability value $S_{i,k}$ for a parcel i with an urban land use k was calculated as follows in Equation 3:

$$S_{i,k} = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_n \beta_n(u_i, v_i)x_n + \varepsilon_i \quad (3)$$

where β_0 is the intercept, β_n the regression coefficient and x_n the value of the explanatory variable n . (u_i, v_i) stand for the coordinates at point i and ε_i is the random error.

Zoning. In this study, the zoning classification established by each town plan has been condensed into the following three categories: urban land, undeveloped land and protected nonurban land.

This factor controls the weighting assigned to each parcel based on its suitability for development according to the legal planning framework.

Neighbourhood. There is no consensus among researchers on how to implement the neighbourhood factor (Chen et al., 2017). In this research, the vector Enrichment Factor (vF) was implemented in the model (van Vliet et al., 2013; Verburg et al., 2004). This index is calculated using a boundary buffer intersect traced at a specified distance around the spatial feature due to the irregular shape and size of the land parcels in the study area. All the parcels that intersect with this buffer zone are considered as neighbours.

The *Enrichment Factor* (Equation 4) calculates the proportion of a given urban land use within a specific distance from the target parcel with respect to the proportion of said urban land use within the entire study area.

$$vF_{i,k,d} = \frac{1}{N} \sum_{i \in I} \frac{a_{k,d,i} / a_{d,i}}{A_k / A} \quad (4)$$

where I indicates the set of all the parcels in the study area, i each of them and N their sum, $a_{i,k,d}$ is the sum of the total area of the parcels with urban land use k within the distance buffer d , $a_{i,d}$ is the sum of the total area of the parcels within the distance buffer d , A_k is the total area occupied by an urban land use k in the study area and A is the total area of the study area. Applying this formula, a total of 25 attraction-repulsion functions were generated for all possible combinations of each pair of land uses, capturing possible effects of land use segregation/mixing and distance-dependent processes. These functions were calculated using a distance range of 50 to 800 m, in steps of 50.

4.2. MODEL CALIBRATION AND VALIDATION

The three-step modelling approach (calibration, simulation and validation) was employed to ensure that the model was operating correctly (Camacho Olmedo et al., 2018) before disruptive scenario simulation. Since the horizon for future simulation is 32 years (2018 - 2050), it was decided to use the same time looking backwards for the training period. This was divided into calibration (1986 - 2002) and simulation (2002 - 2018), with the last year used for validation (2018). This period was considered long enough to minimise the impact of non-representative characteristics.

In order to assess the results obtained in the calibration and validation processes, Figure of Merit (FOM) and its complements Producer Accuracy (PA) and User Accuracy (UA) were used (Equations 5, 6 and 7 respectively) (Pontius et al., 2008). The proportion of area that has changed with respect to the total of the study area is low, justifying the use of FOM instead of Overall Accuracy (Pontius et al., 2008). FOM is a ratio between 0 and 1 that compares the simulated change with the reference change in the analysed period. 0 indicates no overlap between simulated and reference changes and 1 indicates 100% agreement between them.

$$FOM = \frac{Hits}{Misses + Hits + Wrong Hits + False Alarms} \quad (5)$$

$$PA = \frac{Hits}{Misses + Hits + Wrong Hits} \quad (6)$$

$$UA = \frac{Hits}{Hits + Wrong Hits + False Alarms} \quad (7)$$

The model was calibrated using the period 1986 - 2002. For this purpose, neighbourhood and stochastic perturbation parameters were analysed. First, the neighbourhood was fitted independently for the model, using it as a single factor. For this purpose, buffer sizes between 50 m and 800 m (in intervals of 50 m) were tested. After selecting the best performing buffer size, 30 simulations were run for each α value between 0 and 1 (in intervals of 0.1).

After that, a simulation was carried out for the period 2002-2018 using the parameters that best fitted the model to the study area. Model validation attempts to indicate the goodness of fit, on which the credibility of the model will depend (Camacho Olmedo et al., 2018). Thus, once calibration and simulation had been completed, the next stage was to validate the model by assessing the accuracy of the results of the simulation step with the metrics described above. This was done by comparing the 2018 simulated map with the 2018 reference map.

4.3. PARTICIPATORY SCENARIO-BUILDING

During the course of this research, seven narrative storylines on the evolution of land use and transport by 2050 were created by conducting semi-structured interviews with a sample of 129 local people in the study area, incorporating wild cards to stimulate more disruptive thinking (Soria-Lara et al., 2021). Wild cards are defined as turning points in the trend, caused by sudden incidents (Mendonça et al., 2004). This methodology allowed us to envision imaginable and unimaginable, but plausible, futures. The most disruptive narrative according to Soria-Lara et al. (2021), High levels of lack of security in urban areas, was chosen to test the model. During the narrative assessment process, 71% of the experts indicated that this narrative waom home. It also led to changes in people's lifestyles (Belzunegui-Eraso & Erro-Garcés, 2020) with short journeys (to work, school, shopss very disruptive, and 10% described it as highly disruptive. A summary of this narrative is described below:

The 2050 future is characterised by a high level of lack of security in the population as a consequence of increasing social inequalities. Public green areas would be converted into private spaces, with some of them used for additional car infrastructures. There would be a preference amongst high-income families for living in the periphery of the city in private residential communities because the city centres have become unsafe. Consequently, the modal split would be drastically altered, with the private car being by far the most popular option for all daily trips. As a result, urban land uses would be highly segregated into homogenous areas connected by motorised infrastructures. Lack of security in the city centres would lead to their abandonment, with just a few specific economic activities (retail, restaurants, offices, etc.) and low-income families remaining in these areas.

The information provided by narrative storylines is mainly qualitative, and it is a challenge to obtain quantitative information as inputs for modelling scenarios (Hewitt et al., 2014; van Delden & Hagen-Zanker, 2009; White et al., 2004). This issue was addressed by combining a participatory workshop with narrative storylines. In the first part of the workshop (Molinero-Parejo, Aguilera-Benavente, Gómez-Delgado, et al., 2021), stakeholders (urban planners, transport planners, real estate developers, civil engineering lecturers and environmental consultants) quantified the growth of each urban land use for the selected scenario, basing themselves on their knowledge of its past trajectory in order to establish consistent and plausible values.

They also assessed the degree of land use mixing and urban sprawl scored on a 5-point Likert scale. Land use mixing was evaluated as low (2), while urban sprawl was evaluated as very high (5). Later, stakeholders created an overview and dynamic map (represented by markers) of the narrative storyline to spatially represent its main characteristics in a general overview, considering

new urban developments and drawing new transport infrastructures (Figure 4). This map, besides serving as input for some factors of the model, is an essential piece of the scenario evaluation process, as it allows to compare and evaluate the consistency of the results under combined methods.



Figure 4. Participants discussing the “*High levels of lack of security in urban areas*” scenario during the participatory workshop.

4.4. LINKING PARTICIPATORY APPROACHES WITH LP-CA TO SIMULATE DISRUPTIVE PROCESSES

There is insufficient information to fit the model to simulations of disruptive futures. In order to overcome this problem, the workshop results, derived from the interaction between participants, were semi-quantified and linked to the parameters of the LP-CA model, which therefore processed both land use quantity and allocation information. The neighbourhood and stochastic perturbation factors were calibrated using a past time period and multiple model runs, however, the accessibility, suitability and zoning factors have been fitted based on the expert knowledge obtained from the participatory workshop. The participants began by indicating the quantity of growth for each urban land use, taking urban growth over the period 1986 - 2018 as a reference, and were free to indicate the quantity of loss if they considered it, according to the narrative. The proportions were adapted as percentages to make it easier for participants to understand them. Raw quantities were avoided. The percentages were as follows:

- (-) [1986-2018 growth] - (25% of [1986-2018 growth])
- (=) [1986-2018 growth]
- (+) [1986-2018 growth] + (25% of [1986-2018 growth])
- (++) [1986-2018 growth] + (50% of [1986-2018 growth])
- (+++) [1986-2018 growth] + (75% of [1986-2018 growth])

These percentages were converted into quantitative values as inputs for the LP-CA model, establishing the gains and losses for the selected period (Table 1).

Table 2. Gains and losses in each urban land use over the period 2018-2050.

Land use	Growth rate	Gain (ha)	Loss (ha)
Commerce & utilities	=	1,141.17	81.30
Industrial	-	717.66	113.27
Single-family residential	+++	1,163.55	88.26
Multi-family residential	=	67.77	52.31
Mixed (Residential & commercial)	-	0.00	18.44

*Quantities estimated in line with expert opinion, bearing in mind the changes over the period 1986-2018.

Another key component addressed during the workshop was accessibility. When making simulations, only the transport infrastructures already existing in the reference year are taken into consideration. However, any new infrastructures constructed during the selected period will inevitably influence future urban growth. The experts were therefore asked to draw possible new transport infrastructures on the map, which were included in the accessibility calculations.

In terms of spatial allocation, markers were used to allocate different land uses to different places on the overview map. This provided an important input for calculating suitability maps. The growth hotspots identified by the experts were selected as a dependent variable for the GWLR. To obtain a suitability value for each urban land use on each parcel, we used factors such as elevation, slope, distance to parks, distance to interurban bus stops or distance to facilities or amenities, as applied in similar studies on simulating large-scale urban land use change (Abolhasani et al., 2016; White et al., 1997).

If the envisioned futures are disruptive, zoning also has to be adjusted in line with the selected scenario. For example, users could establish a weighting value for each zoning category so as to prioritize new urban development on undeveloped land. Similarly, building on protected land could be completely restricted by giving such areas a zero weighting. Alternatively, users could give protected areas a slightly higher weighting, so allowing for a scenario in which some illegal development of protected land occurs. Based on the overview map created by the experts, values of 0.95, 0.03 and 0.02 were established for urban land, undeveloped land and protected nonurban land respectively.

It should also be noted that most buildings require a significant initial investment, and in some cases, such as commercial or industrial uses, it may take several years for them to become profitable. This makes a short-term change in land use unlikely (van Vliet et al., 2013). For this reason, the model also considers the conversion inertia of those parcels that already have a particular urban land use. For this purpose, the percentage of markers in which the land use exchanged (as denoted in the overview map created during the workshop) was considered. It is also important to remember that land use can also change from urban to nonurban. This is often due to the abandonment of buildings or the reclamation of natural areas. The ability to simulate this transition was also integrated into the model as part of its adaptation to disruptive scenarios. For the selected scenario, a loss probability map was calculated based on the distance to the centre of the medium-sized cities (as reflected in the narrative storyline) and the markers removed from each urban land use. A summary of the overall operation and adaptation of the model can be seen in Figure 5.

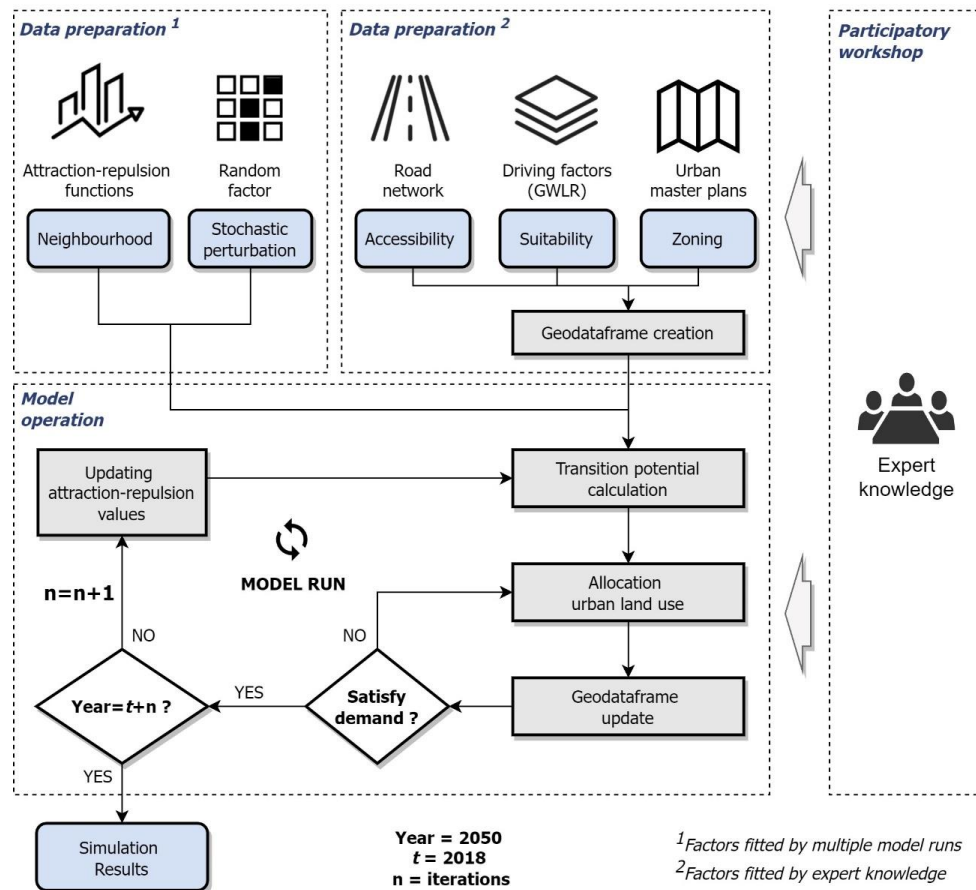


Figure 5. Flowchart of the adapted LP-CA model.

4.5. PARTIAL VALIDATION OF SIMULATED FUTURE SCENARIOS

To evaluate the results of the simulated future scenario, a partial validation was carried out. First, a detailed visual analysis was conducted, identifying, and linking most characteristic urban processes with the narrative storyline. A frequency map for each urban land use was also obtained, representing the number of times the model has allocated a particular use to each parcel, bearing in mind the stochastic perturbation. To this end, a total of 30 simulations were run with the alpha value for stochastic perturbation set to 0.2. In addition to their spatial representation on the frequency map, the percentage of land parcels in which land use changed was statistically analysed. In previous research, methods like these have been used to validate simulation results and to observe the propagation of error due to uncertainty (Barreira-González, Aguilera-Benavente, et al., 2015).

5. RESULTS

5.1. MODEL CALIBRATION AND VALIDATION RESULTS

The calibration results for the period 1986-2002 report a maximum FOM value of 0.2617 using a neighbourhood size of 200 m for the calculation of the attraction-repulsion effects. As illustrated in Figure 6, the LP-CA model is sensitive to neighbourhood size, showing a variation in FOM of up to 0.067. PA and UA accuracy metrics have a greater range of variation. However, although PA values show a similar trend to FOM values, UA values reach their maximum value at 750 m.

Over this distance, a significant decrease in accuracy can be observed in the three metrics. In this case, an excessively large neighbourhood size can cause the capture of too many land parcels, so producing an overestimation of the attraction-repulsion effects.

Once the neighbourhood factor had been fitted, 30 simulations were carried out to identify the most suitable α value for stochastic perturbation. An analysis of the mean values for the distribution derived from the results for each α value showed that the best results were achieved with $\alpha = 0.2$, with a mean FoM value of 0.2666 (Figure 7).

The model validation results indicate a satisfactory performance of the model (FOM = 0.2817), with an accuracy value in the general range reported in other studies that simulate urban land uses with vector-based or land parcel CA models (Yao et al., 2017; Zhai et al., 2020; Zhu et al., 2020). In the research conducted by Pontius et al. (2008), regions with net changes of less than 10% of the total area did not exceed FOM values of 0.15. This means that simulating large areas and periods with few changes can result in low FOM values.

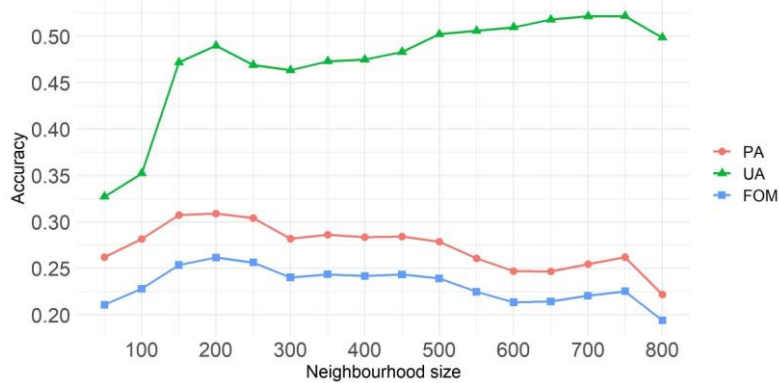


Figure 6. Accuracy assessments for different neighbourhood sizes.

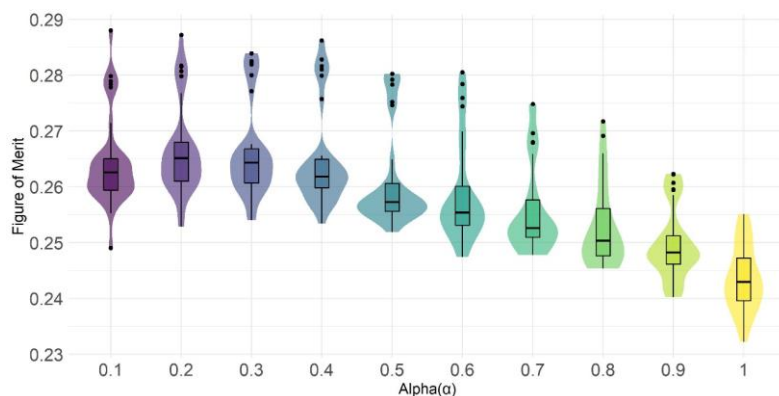


Figure 7. Accuracy assessments (FOM) for the different α values used in the calibration of stochastic perturbation.

Therefore, we can conclude that the results obtained in the calibration and validation of the model (FOM values of 0.26 and 0.28 respectively) are good enough for their main purpose, since they exceed the range of 0.15, indicating a higher value than expected in other applications with net changes of less than 10% of the total study area. It should be noted that the changes that occurred in the period 2002-2018 affected 3.42% of the total area.

5.2. RESULTS FOR THE SIMULATION OF DISRUPTIVE FUTURE SCENARIOS

Figure 8 shows the future scenario simulated in the Henares Corridor, Madrid - Guadalajara (Spain) for the period 2018-2050. Several urban processes can be identified. In the first zoomed-in area (1), significant changes can be observed from multi-family residential to single-family residential. This conversion phenomenon is also found in several other urban centres in the study area, leading to a process of homogenisation of the urban landscape. This is linked to the segregation of urban land uses, one of the characteristics highlighted in the narrative. In the second zoomed-in area (2), urban land has been lost as a result of the abandonment of built-up areas in city centres. This is a typical characteristic of shrinking cities. In fact, during the past decade, the municipality of Alcalá de Henares has suffered a significant decline in population. Finally, in the third zoomed-in area (3) in a peripheral municipality, dramatic growth can be observed in single-family residential. Thus, if we analyse the overall spatial configuration, major urban growth can be observed in the peripheral areas. This results in significant urban sprawl within the metropolitan areas.

If the results are analysed in quantitative terms, with the given parameters, the model reports that 0.61% of the study area would be abandoned during the study period (2018-2050). It also found, by contrast, that 6.64% of the total area would be developed (nonurban to urban). In addition, 1304 land parcels - just 0.2% of the total area - would undergo a change of use. This means that, in total, 7.45% of the study area would experience changes, while the other 92.54% would remain stable over this period. Table 2 shows the area and the number of parcels covered by each urban land use in the reference map and the simulated map.

If the total area by 2050 (far right-hand column) is compared with the total area in 2018 (bottom row), there is growth in all urban land uses, apart from mixed residential which has declined slightly. The number of parcels covered by multi-family residential use has also fallen slightly despite an increase in the total area. This is due to the process of urban land use conversion, and the use of irregular land parcels. The highlighted values on the diagonal show the stable land that did not change in each category, while the off-diagonal values show the transitions from one urban land use to another. The largest transition is from multi-family residential to single-family residential.

5.3. MAPPING OF THE MOST FREQUENTLY DEVELOPED LAND PARCELS

By integrating stochastic perturbation into the simulation, it is possible to get some idea of the possible directions in which the different urban land uses may grow under the selected scenario and consider the possible associated errors. On the basis of 30 model executions, frequency maps were generated showing the number of times the same land use was allocated to the same land parcel (Figure 9).

In this regard, Table 3 offers a detailed picture of how the model performs with the integration of stochastic perturbation. The industrial and single-family residential uses are quite consistent, with around 90% of the simulated land parcels being allocated in the same location. However, commerce and utilities and multi-family residential uses show more variability. For both these land uses, about 30% of all the land parcels that changed across the 30 model executions were allocated in the same location. The fact that commerce and utilities, and multi-family residential uses show greater variability in parcel allocation is linked to the fact that both are under-represented in the study area.

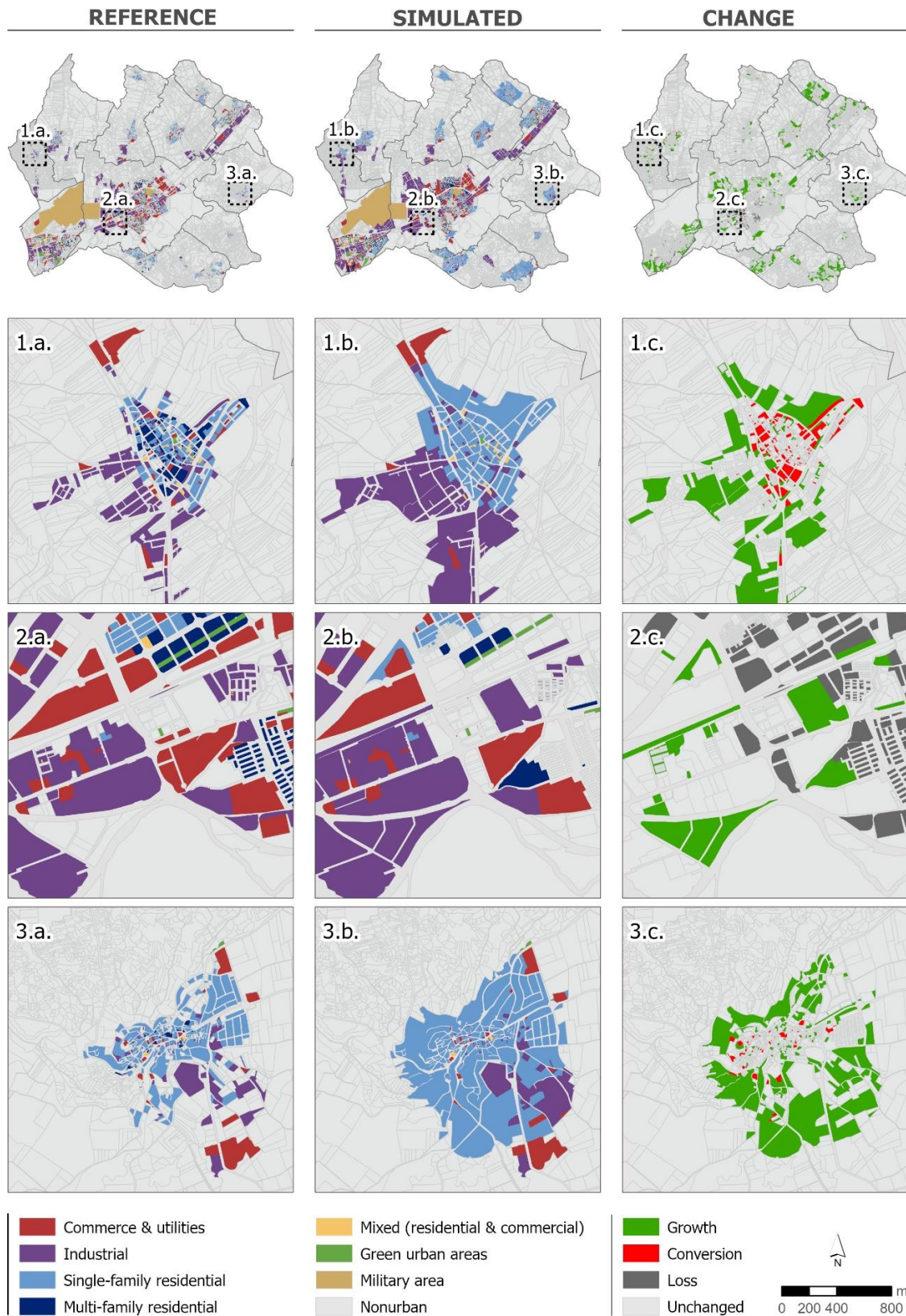


Figure 8. Reference map (2018), simulated map (2050), and change map (land use changes 2018-2050) of the study area. The zoomed windows show detailed views of the urban areas of (1) Ajalvir, (2) Alcalá de Henares and (3) Los Santos de la Humosa.

Table 3. Area-based matrix for the transitions between different urban land use categories for the simulated period (2018 – 2050) in hectares. Values in brackets denote the number of parcels.

		2018						
2050		Commerce & utilities	Industrial	Single-family	Multi-family	Mixed	Nonurban	Total in 2050
Commerce & utilities	805.37 (1470)	0 (0)	5.47 (302)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	185.46 (340)	996.29 (2112)
Industrial	0.43 (6)	1379.74 (4344)	0.01 (1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	794.13 (1189)	2174.33 (5540)
Single-family	14.57 (83)	18.38 (312)	847.24 (24100)	26.78 (399)	0.04 (1)	1143.70 (4892)	2050.75 (29787)	
Multi-family	0 (0)	0.03 (7)	3.25 (193)	281.49 (3130)	0 (0)	138.97 (375)	423.77 (3705)	
Mixed	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	75.06 (1002)	0 (0)	75.07 (1002)	
Nonurban	62.84 (191)	58.78 (355)	32.43 (1441)	48.26 (782)	6.32 (111)	26552.47 (10194)	26761.14 (13074)	
Total in 2018	883.22 (1750)	1456.95 (5018)	888.41 (26037)	356.56 (4311)	81.44 (1114)	28814.76 (16990)	32481.34 (55220)	

Table 4. Percentage of land parcels that have been allocated to the same location and category of all the land parcels that changed across 30 model executions.

Times simulated	Commerce and utilities	Industrial	Single-family	Multi-family
1	12.01%	1.90%	0.69%	8.03%
2 - 5	41.22%	4.44%	1.84%	15.78%
6 - 10	4.97%	0.95%	0.74%	5.41%
11 - 15	3.46%	0.71%	0.64%	3.34%
16 - 20	2.19%	1.27%	0.59%	6.85%
21 - 25	2.89%	1.03%	0.61%	8.03%
26 - 29	11.89%	2.38%	1.78%	31.47%
30	33.37%	89.22%	93.79%	29.13%

6. DISCUSSION

6.1. INTEGRATING MODELLING AND PARTICIPATION TO ENVISION DISRUPTIVE FUTURES

Uncertainty arising from the occurrence of sudden unexpected events is one of the major challenges facing urban planning (Goodspeed, 2020). This has become particularly clear during the SARS-CoV-2 pandemic, one of whose side effects was the huge increase in people working from home. It also led to changes in people's lifestyles (Belzunegui-Eraso & Erro-Garcés, 2020) with short journeys (to work, school, shops, etc.) falling by 50% compared to the pre-pandemic period (Fatmi, 2020). These changes may result in a spatial redistribution of urban land uses. Therefore, the use of multiple disruptive scenarios and the inclusion of stakeholders in urban and regional planning practices would assist in minimising uncertainty and managing such complex phenomena in a comprehensive manner.

The importance of participation in urban and regional planning has been emphasised in the literature (Brown & Wei Chin, 2013), however, engaging the general public in processes of this kind is a complicated task that requires a major two-way collaborative effort between researchers and the public. In this context, the ideas provided through semi-structured interviews allowed for

the creation of multiple narrative storylines. The use of wild cards as conditioners or breakpoints proved a crucial factor in inspiring more disruptive thinking (Soria-Lara et al., 2021). Some of these narratives were subsequently used in a workshop in which a range of experts in this field were invited to participate. These experts collaborated in the analysis, design, and discussion tasks in relation to the spatial configuration of urban land uses and the transport network, so generating inputs for the LP-CA model.

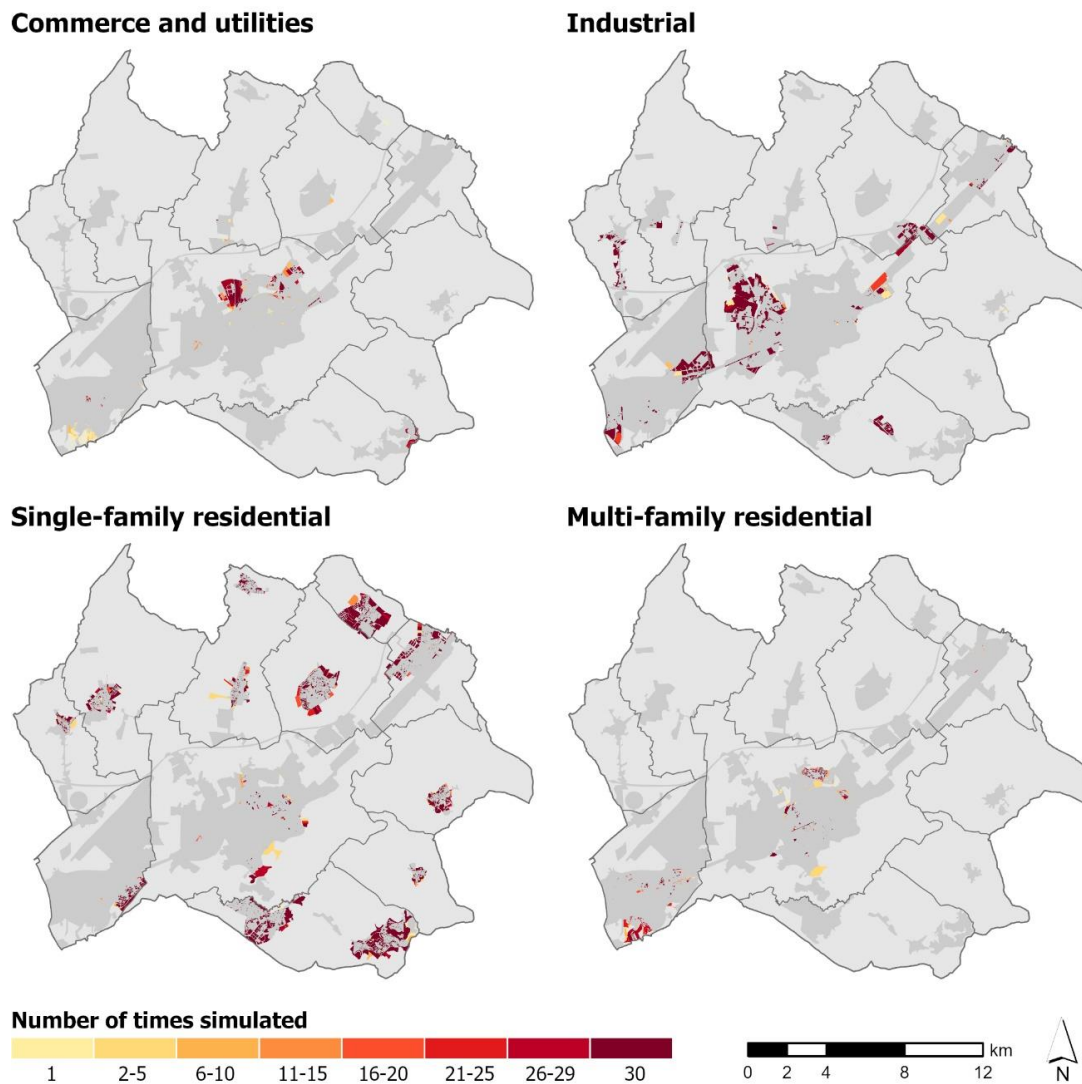


Figure 9. Frequency maps showing the number of times the same land use was allocated to the same land parcel in 30 model executions with stochastic perturbation ($\alpha = 0.2$). Dark grey represents urban areas in the reference year.

Another challenge is to explain to stakeholders how the CA models work. Even the simplest of these models are primarily designed for use by a specialised research audience. By holding the workshop, this gap between stakeholders and researchers was minimized, the necessary know-how was collected and converted into inputs for the LP-CA model, and the quality of the information was improved by integrating the human component. The quantity of growth for each urban land use was added at the discretion of experts and stakeholders, while the accessibility, suitability and zoning maps were generated later with the support of the information obtained from the overview map. It should also be noted that both the workshop map and the simulated

map are complementary, providing under-recognized aspects or gaps not visible in a unilateral manner, and checking the entire process of modelling future scenarios for greater consistency of the outcomes.

This participatory process made it possible to configure several parameters of the model by providing a critical and objective perspective of the spatial configuration of urban land use as reflected in the narrative storyline. The use of land parcels also offers the stakeholders a much clearer picture of the outcomes, so facilitating the interpretation process. It is also necessary to explore other possible methods for validating and/or evaluating future disruptive scenarios, as the future by its very nature is unknown and we have no on-the-ground evidence with which to compare it. A crucial step in successfully completing this participatory planning process through disruptive future scenarios is to hold a new workshop, in which citizens, experts and stakeholders collaborate to visualise, analyse, and evaluate the outcomes of the simulated urban land use maps that they themselves helped generate.

6.2. PRACTICAL CONSIDERATIONS OF LP-CA MODEL IN SIMULATING DISRUPTIVE SCENARIOS

The main purpose of the LP-CA model is to generate land use trajectories that are spatially consistent with the disruptive narrative storylines. The accuracy metrics used to assess the model indicated that it was operating correctly. In this respect, it is worth remembering that the FOM values are not only affected by the size of the study area or by the percentage of the total area in which land use changes, and that simulating separate urban areas makes it even more difficult to allocate new urban land uses. Another problem that can complicate the simulation of large study areas is the competition between different urban areas, which can lead to the expected quantity of growth being concentrated in a single municipality, so preventing the others from growing.

The results of the disruptive scenario simulation were consistent with the description of the selected narrative storyline. Processes described in the scenario narrative (segregation of urban land uses, significant expansion of single-family residential on the periphery, and the abandonment of city centres) were identified in simulated maps, as shown in Figure 8. Moreover, the use of land parcels as the spatial unit enabled the model to produce more realistic urban dynamics, which adapted to the spatial boundaries defined by legislative planning.

In addition, internal transitions between the urban land uses of already developed parcels, and transitions from urban to nonurban, have been critical components in the simulation of disruptive future scenarios. Although these urban dynamics are integrated into most of the simulation models based on regular CA, they are not normally found in irregular models, especially in those that use land parcels as the spatial unit (Barreira-González et al., 2019; Zhai et al., 2020). This is a significant step forward.

The influence of stochastic perturbation was also spatially represented for each urban land use. In this family of CA-models, it is particularly important to reflect the impact of randomness as a way of measuring those urban processes that do not respond to deterministic causes (Barreira-González et al., 2019). Single-family residential and industrial uses were allocated in the same places in around 90% of the runs, so indicating that stochastic perturbation has little influence. This suggests a greater robustness of both urban land uses in terms of their spatial distribution. In the Spanish case, the industrial fabric and single-family housing developments have well-defined locations, tending to grow in a compact and segregated manner. By contrast, multi-family residential and commercial and utilities uses were strongly affected by this parameter, as manifested in greater spatial variation in the places allocated to these uses. The development of these two urban land uses is more scattered and heterogeneous, which makes it more difficult to establish rules or factors that explain their spatial distribution.

7. CONCLUDING REMARKS AND FURTHER RESEARCH

The authors consider that the methodology developed in this study makes an important contribution to research in this field, in that it complements the multi-scenario approach as a tool for supporting local urban management and decision-making processes, by allowing a better understanding of uncertainty in urban environments. It prepares planners to act in a wide range of situations, enabling them to make more informed decisions. It is particularly relevant today in a period of strong uncertainty, as can be observed in the growing trend of publications focusing on disruption in the anticipation of future events.

The results show that this model successfully simulates urban expansion (growth), the change from one urban land use to another (conversion), and the abandonment of urban areas (loss) at parcel level as relevant processes in the mapping of disruptive scenarios. Furthermore, the improvement from previous versions of the model in terms of the number of simulated land uses and urban dynamics (Barreira-González et al., 2019; Barreira-González, Gómez-Delgado, et al., 2015) provides a better picture of the general distribution of city functions, so allowing a more accurate spatial simulation of multi-future scenario narratives. This approach contributes to the exploration of imaginable and unimaginable futures (that may or may not happen) and the envisioning of spatial consequences they may have on urban environments, providing support in anticipatory decision-making in land use planning.

Lastly, to complete the cycle of prospective scenario planning, a final step focusing on scenario evaluation and the identification of associated impacts is required. A new method for validating future disruptive scenarios through a participatory workshop, in which stakeholders and experts collaborate to analyse the outcomes of the simulation is being explored. However, it is important that the process in which urban land uses are allocated to the different parcels provides easily interpretable, clear outcomes for the actors who assess and analyse the scenarios, so assisting in the decision-making process and in the design of policy packages.

APPENDIX I. SUPPLEMENTARY DATA

Supplementary data to this article can be found online at <https://github.com/TransUrban-UAH/LP-CA-Model>.

REFERENCES

- Abolhasani, S., Taleai, M., Karimi, M., & Rezaee Node, A. (2016). Simulating urban growth under planning policies through parcel-based cellular automata (ParCA) model. *International Journal of Geographical Information Science*, 30(11), 2276–2301. <https://doi.org/10.1080/13658816.2016.1184271>
- Aburas, M. M., Ho, Y. M., Ramli, M. F., & Ash'aari, Z. H. (2016). The simulation and prediction of spatio-temporal urban growth trends using cellular automata models: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 380–389. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.07.007>
- Antipova, T. (2021). Coronavirus Pandemic as Black Swan Event. In *Lecture Notes in Networks and Systems* (Vol. 136, pp. 356–366). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49264-9_32

- Barreira-González, P., Aguilera-Benavente, F., & Gómez-Delgado, M. (2015). Partial validation of cellular automata based model simulations of urban growth: An approach to assessing factor influence using spatial methods. *Environmental Modelling and Software*, 69, 77–89. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.03.008>
- Barreira-González, P., Aguilera-Benavente, F., & Gómez-Delgado, M. (2019). Implementation and calibration of a new irregular cellular automata-based model for local urban growth simulation: The MUGICA model. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 46(2), 243–263. <https://doi.org/10.1177/2399808317709280>
- Barreira-González, P., Gómez-Delgado, M., & Aguilera-Benavente, F. (2015). From raster to vector cellular automata models: A new approach to simulate urban growth with the help of graph theory. *Computers, Environment and Urban Systems*, 54, 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbysys.2015.07.004>
- Batty, M. (2020). Defining Complexity in Cities. In D. Pumain (Ed.), *Theories and Models of Urbanization. Geography, Economics and Computing Sciences* (pp. 13–26). Springer International Publishing.
- Belzunegui-Eraso, A., & Erro-Garcés, A. (2020). Teleworking in the Context of the Covid-19 Crisis. *Sustainability*, 12(9), 3662. <https://doi.org/10.3390/su12093662>
- Benenson, I., & Torrens, P. M. (2004). *Geosimulation. Automata-based modeling of urban phenomena*. Wiley.
- Brown, G., & Wei Chin, S. Y. (2013). Assessing the Effectiveness of Public Participation in Neighbourhood Planning. *Planning, Practice & Research*, 28(5), 563–588. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/02697459.2013.820037>
- Burriel, E. L. (2011). Subversion of land-use plans and the housing bubble in Spain. *Urban Research & Practice*, 4(3), 232–249. <https://doi.org/10.1080/17535069.2011.616743>
- Camacho Olmedo, M. T., Paegelow, M., Mas, J. F., & Escobar, F. (2018). *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios. An Introduction* (M. T. Camacho Olmedo, M. Paegelow, J. F. Mas, & F. Escobar (eds.)). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60801-3_1
- Cantergiani, C., & Gómez Delgado, M. (2020). Simulación del crecimiento urbano con AMEBA: Modelo Basado en Agentes para la ocupación residencial. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 86. <https://doi.org/10.21138/bage.2910>
- Chen, Y., Liu, X., & Li, X. (2017). Calibrating a Land Parcel Cellular Automaton (LP-CA) for urban growth simulation based on ensemble learning. *International Journal of Geographical Information Science*, 31(12), 2480–2504. <https://doi.org/10.1080/13658816.2017.1367004>
- Christensen, C. M. (1997). *The Innovator's Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms to Fail* (C. Christensen (ed.)). Harvard Business Review Press.
- Domingo, D., Palka, G., & Hersperger, A. M. (2021). Effect of zoning plans on urban land-use change: A multi-scenario simulation for supporting sustainable urban growth. *Sustainable Cities and Society*, 69, 102833. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102833>
- Fatmi, M. R. (2020). COVID-19 impact on urban mobility. *Journal of Urban Management*, 9(3), 270–275. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2020.08.002>

- Feng, Y., Cai, Z., Tong, X., Wang, J., Gao, C., Chen, S., & Lei, Z. (2018). Urban Growth Modeling and Future Scenario Projection Using Cellular Automata (CA) Models and the R Package Optimx. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(10), 387. <https://doi.org/10.3390/ijgi7100387>
- Fotheringham, A. S., Brunson, C., & Charlton, M. (2002). Geographically weighted regression. The analysis of spatially varying relationships (A. S. Fotheringham, C. Brunson, & M. Charlton (eds.)). Ltd, John Wiley & Sons.
- Goodspeed, R. (2020). *Scenario Planning for Cities and Regions: Managing and Envisioning Uncertain Futures*. Lincoln Institute of Land Policy. <https://books.google.es/books?id=SffpywEACAAJ>
- Haase, A., Athanasopoulou, A., & Rink, D. (2016). Urban shrinkage as an emerging concern for European policymaking. *European Urban and Regional Studies*, 23(1), 103–107. <https://doi.org/10.1177/0969776413481371>
- Hamnett, C., & Whitelegg, D. (2007). Loft conversion and gentrification in London: From industrial to postindustrial land use. *Environment and Planning A*, 39(1), 106–124. <https://doi.org/10.1068/a38474>
- Hampshire, J. (2015). Europe's Migration Crisis. *Political Insight*, 6(3), 8–11. <https://doi.org/10.1111/2041-9066.12106>
- Hewitt, R., van Delden, H., & Escobar, F. (2014). Participatory land use modelling, pathways to an integrated approach. *Environmental Modelling and Software*, 52, 149–165. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.10.019>
- Houet, T., Marchadier, C., Bretagne, G., Moine, M. P., Aguejda, R., Vigié, V., Bonhomme, M., Lemonsu, A., Avner, P., Hidalgo, J., & Masson, V. (2016). Combining narratives and modelling approaches to simulate fine scale and long-term urban growth scenarios for climate adaptation. *Environmental Modelling & Software*, 86, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.09.010>
- Jia, Z., Chen, L., Chen, J., Lyu, G., Zhou, D., & Long, Y. (2020). Urban modeling for streets using vector cellular automata: Framework and its application in Beijing. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 47(8), 1418–1439. <https://doi.org/10.1177/2399808320942777>
- Kok, K., & van Delden, H. (2009). Combining two approaches of integrated scenario development to combat desertification in the Guadalentín watershed, Spain. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36(1), 49–66. <https://doi.org/10.1068/b32137>
- Kok, K., & van Delden, H. (2013). Linking Narrative Storylines and Quantitative Models to Combat Desertification in the Guadalentín Watershed (Spain). In M. Giaoutzi & B. Sapio (Eds.), *Recent Developments in Foresight Methodologies* (pp. 203–2014). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5215-7>
- Laird, J. (2014). Evaluating transport and land use interventions in the face of disruption. *Universities' Transport Study Group*, 1–14.
- Lami, I. M. (2020). *Abandoned Buildings in Contemporary Cities: Smart Conditions for Actions* (Vol. 168). <http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-35550-0>

- Liu, X., Liang, X., Li, X., Xu, X., Ou, J., Chen, Y., Li, S., Wang, S., & Pei, F. (2017). A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 168, 94–116. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.09.019>
- Lyons, G., & Davidson, C. (2016). Guidance for transport planning and policymaking in the face of an uncertain future. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 88, 104–116. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.03.012>
- Mendonça, S., Pina e Cunha, M., Kaivo-oja, J., & Ruff, F. (2004). Wild cards, weak signals and organisational improvisation. *Futures*, 36(2), 201–218. [https://doi.org/10.1016/S0016-3287\(03\)00148-4](https://doi.org/10.1016/S0016-3287(03)00148-4)
- Millar, C., Lockett, M., & Ladd, T. (2018). Disruption: Technology, innovation and society. *Technological Forecasting and Social Change*, 129, 254–260. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.10.020>
- Mirbagheri, B., & Alimohammadi, A. (2017). Improving urban cellular automata performance by integrating global and geographically weighted logistic regression models. *Transactions in GIS*, 21(6), 1280–1297. <https://doi.org/10.1111/tgis.12278>
- Molinero-Parejo, R., Aguilera-Benavente, F., & Gómez-Delgado, M. (2021). Regresión Logística Geográficamente Ponderada para identificar los factores explicativos de la distribución de usos de suelo en escenarios futuros de crecimiento urbano. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 88. <https://doi.org/10.21138/bage.3052>
- Molinero-Parejo, R., Aguilera-Benavente, F., Gómez-Delgado, M., & Soria-Lara, J. A. (2021). Mapping disruptive long-term scenarios using a participatory approach. *Journal of Maps*, 1–10. <https://doi.org/10.1080/17445647.2021.1937726>
- Mustafa, A. M., Saadi, I., Cools, M., & Teller, J. (2015). Modelling Uncertainties in Long-Term Predictions of Urban Growth: A Coupled Cellular Automata and Agent-Based Approach. *Computational Urban Planning and Urban Management*, 284–301.
- O'Sullivan, D. (2001). Graph-cellular automata: A generalised discrete urban and regional model. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28(5), 687–705. <https://doi.org/10.1068/b2707>
- Peterson, G. D., Cumming, G. S., & Carpenter, S. R. (2003). Scenario Planning: a Tool for Conservation in an Uncertain World. *Conservation Biology*, 17(2), 358–366.
- Pinto, N. N., & Antunes, A. P. (2010). A cellular automata model based on irregular cells: Application to small urban areas. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 37(6), 1095–1114. <https://doi.org/10.1068/b36033>
- Plata Rocha, W., Gómez-Delgado, M., & Bosque-Sendra, J. (2011). Simulating urban growth scenarios using GIS and multicriteria analysis techniques: A case study of the Madrid region, Spain. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 38(6), 1012–1031. <https://doi.org/10.1068/b37061>
- Pontius, R. G., Boersma, W., Castella, J. C., Clarke, K., Nijs, T., Dietzel, C., Duan, Z., Fotsing, E., Goldstein, N., Kok, K., Koomen, E., Lippitt, C. D., McConnell, W., Mohd Sood, A., Pijanowski, B., Pithadia, S., Sweeney, S., Trung, T. N., Veldkamp, A. T., & Verburg, P. H. (2008). Comparing the input, output, and validation maps for several models of land change. *Annals of Regional Science*, 42(1), 11–37. <https://doi.org/10.1007/s00168-007-0138-2>

- Rodrigues, C., & Freire, F. (2017). Adaptive reuse of buildings: Eco-efficiency assessment of retrofit strategies for alternative uses of an historic building. *Journal of Cleaner Production*, 157, 94–105. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.104>
- Santé, I., García, A. M., Miranda, D., & Crecente, R. (2010). Cellular automata models for the simulation of real-world urban processes: A review and analysis. *Landscape and Urban Planning*, 96(2), 108–122. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.03.001>
- Soria-Lara, J. A., Ariza-Álvarez, A., Aguilera-Benavente, F., Cascajo, R., Arce-Ruiz, R. M., López, C., & Gómez-Delgado, M. (2021). Participatory visioning for building disruptive future scenarios for transport and land use planning. *Journal of Transport Geography*, 90(December 2019), 102907. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102907>
- Stevens, D., & Dragičević, S. (2007). A GIS-based irregular cellular automata model of land-use change. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 34(4), 708–724. <https://doi.org/10.1068/b32098>
- Stevens, D., Dragicevic, S., & Rothley, K. (2007). iCity: A GIS–CA modelling tool for urban planning and decision making. *Environmental Modelling & Software*, 22(6), 761–773. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.02.004>
- Triantakonstantis, D., & Mountrakis, G. (2012). Urban Growth Prediction: A Review of Computational Models and Human Perceptions. *Journal of Geographic Information System*, 04(06), 555–587. <https://doi.org/10.4236/jgis.2012.46060>
- van Delden, H., & Hagen-Zanker, A. (2009). New Ways of Supporting Decision Making: Linking Qualitative Storylines with Quantitative Modelling. In S. Geertman & J. Stillwell (Eds.), *Planning Support Systems Best Practice and New Methods* (pp. 347–367). Springer.
- van Vliet, J., Naus, N., van Lammeren, R. J. A., Bregt, A. K., Hurkens, J., & van Delden, H. (2013). Measuring the neighbourhood effect to calibrate land use models. *Computers, Environment and Urban Systems*, 41, 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2013.03.006>
- Vaz, E. de N., Nijkamp, P., Painho, M., & Caetano, M. (2012). A multi-scenario forecast of urban change: A study on urban growth in the Algarve. *Landscape and Urban Planning*, 104(2), 201–211. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.10.007>
- Verburg, P. H., de Nijs, T. C. M., Ritsema van Eck, J., Visser, H., & de Jong, K. (2004). A method to analyse neighbourhood characteristics of land use patterns. *Computers, Environment and Urban Systems*, 28(6), 667–690. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2003.07.001>
- White, R., & Engelen, G. (1993). Cellular Automata and Fractal Urban Form: A Cellular Modelling Approach to the Evolution of Urban Land-Use Patterns. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 25(8), 1175–1199. <https://doi.org/10.1068/a251175>
- White, R., Engelen, G., & Uljee, I. (1997). The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(3), 323–343. <https://doi.org/10.1068/b240323>
- White, R., Straatman, B., & Engelen, G. (2004). Planning Scenario Visualization and Assessment: A Cellular Automata Based Integrated Spatial Decision Support System. In M. F. Goodchild & D. G. Janelle (Eds.), *Spatially integrated social science* (pp. 420–456). Oxford University Press.

- Yang, Y., Zhang, D., Nan, Y., Liu, Z., & Zheng, W. (2019). Modeling urban expansion in the transnational area of Changbai Mountain: A scenario analysis based on the zoned Land Use Scenario Dynamics-urban model. *Sustainable Cities and Society*, 50, 10–22. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101622>
- Yao, Y., Liu, X., Li, X., Liu, P., Hong, Y., Zhang, Y., & Mai, K. (2017). Simulating urban land-use changes at a large scale by integrating dynamic land parcel subdivision and vector-based cellular automata. *International Journal of Geographical Information Science*, 31(12), 2452–2479. <https://doi.org/10.1080/13658816.2017.1360494>
- Zapata, M. A., & Kaza, N. (2015). Radical uncertainty: scenario planning for futures. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 42(4), 754–770. <https://doi.org/10.1068/b39059>
- Zhai, Y., Yao, Y., Guan, Q., Liang, X., Li, X., & Pan, Y. (2020). Simulating urban land use change by integrating a convolutional neural network with vector-based cellular automata. *International Journal of Geographical Information Science*, 34(7), 1475–1499. <https://doi.org/10.1080/13658816.2020.1711915>
- Zhou, L., Dang, X., Sun, Q., & Wang, S. (2020). Multi-scenario simulation of urban land change in Shanghai by random forest and CA-Markov model. *Sustainable Cities and Society*, 55, 102045. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102045>
- Zhu, J., Sun, Y., Song, S., Yang, J., & Ding, H. (2020). Cellular automata for simulating land-use change with a constrained irregular space representation: A case study in Nanjing city, China. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 0(1), 1–19. <https://doi.org/10.1177/2399808320949889>

4.4. VALIDACIÓN PARCIAL DEL MODELO DE SIMULACIÓN VECTORIAL LP-CA

RESUMEN

En este trabajo se presenta una propuesta de validación a partir del análisis de sensibilidad de un modelo de simulación de escenarios de crecimiento urbano basado en Autómatas Celulares (AC) vectoriales, ampliamente utilizados ya en este contexto y que en las últimas décadas han experimentado importantes mejoras y adaptaciones a la realidad de la planificación urbana. Entre ellas, la posibilidad de utilizar unidades espaciales de tipo irregular (vectoriales) como la parcela catastral. Además, cada vez es más frecuente encontrar aplicaciones que no se limitan a la simulación de escenarios tendenciales a futuro y que experimentan con la simulación de otros escenarios futuros plausibles. Los resultados de la investigación han verificado que los cuatro factores tienen una incidencia equilibrada en las simulaciones generadas por el modelo LP-CA y, por tanto, todos ellos son relevantes y necesarios.

PALABRAS CLAVE

Análisis de sensibilidad; simulación del crecimiento urbano; AC vectoriales; Corredor del Henares.

Molinero-Parejo, R., Gómez-Delgado, M. & Aguilera-Benavente, F. (2020). *Aplicación de un análisis de sensibilidad para validar un modelo de simulación de crecimiento urbano a partir de autómatas celulares y basado en parcelas (LP-CA)*. XVIII Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica, CONFIBSIG.



Congreso	XVIII Conferencia Iberoamericana de SIG
Fecha	16 al 19 de mayo de 2023
Lugar de celebración	Cáceres, España
Entidades organizadoras	REDISIG y Universidad de Extremadura
Título	Las TIG ante los nuevos retos globales en un contexto cambiante

APLICACIÓN DE UN ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA VALIDAR UN MODELO DE SIMULACIÓN DE CRECIMIENTO URBANO A PARTIR DE AUTÓMATAS CELULARES Y BASADO EN PARCELAS (LP-CA)

1. INTRODUCCIÓN

Si bien ya existen precedentes en la utilización de índices de sensibilidad de tipo global (basados en la varianza) y de tipo OAT (*One factor At a Time*) para realizar un ejercicio adaptado de validación de modelos de simulación de escenarios futuros basados en AC y en formato vectorial, en este trabajo su aplicación presenta dos diferencias y nuevas aportaciones. Partimos de un modelo basado en parcelas (*LP-CA model*), basado en una estructura de cálculo del potencial de transición tradicional (teniendo en cuenta los factores de vecindad, accesibilidad, adecuación y aleatoriedad) (White et al., 1997), así como de un escenario de tipo disruptivo con un horizonte temporal del año 2050 (Molinero-Parejo et al., 2023).

La primera novedad es que se simulan hasta cinco usos del suelo diferentes (comercial, industrial, mixto, multifamiliar y unifamiliar) y, en segundo lugar, no solo es posible la transformación de suelo vacante en suelo urbano, sino que pueden producirse, además, cambios en los usos preexistentes, como puede ser la conversión de uso industrial a unifamiliar o de uso industrial a suelo vacante (pérdida de uso).

2. METODOLOGÍA

Siguiendo la metodología propuesta en Barreira-González et al. (2015) adaptada en Urgilez Clavijo et al. (2019) al formato irregular de parcela, y partiendo de la ejecución de hasta un total de 15 simulaciones (todas las combinaciones posibles entre todos los factores), se han obtenido los pertinentes índices de sensibilidad de primer orden e índices de sensibilidad total para cada uno de los cinco usos simulados y para la unión de todos ellos (Total Urbano). Además, se han realizado los cálculos para toda el área de estudio (superficie preexistente y cambios) y para los cambios exclusivamente (solo nuevas parcelas transformadas en suelo urbano durante el periodo 2018-2050).

Para evaluar los resultados del método, es necesario comparar entre sí los resultados de las simulaciones obtenidas. Esta evaluación se lleva a cabo comparando los mapas simulados obtenidos con el mapa simulado considerado de referencia, es decir, el mapa simulado con todos los factores simultáneamente. La precisión total (*Overall Accuracy*) es el método de comparación utilizado.

Partimos de que el resultado del modelo en cuestión es una función de los factores implementados. En nuestro caso tenemos 5 factores. Sea un modelo Y, el resultado de:

$$Y = f(X) = f(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5)$$

La varianza de los resultados del modelo Y puede explicarse como la suma de las varianzas de cada uno de los cinco factores (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5), más la suma de las varianzas de los factores dos a dos, más la suma de las varianzas de los factores tres a tres, etc. Esta varianza la denominamos Varianza Total denotada normalmente como $V(Y)$.

$$V(Y) = \sum_i V_i + \sum_{i < j} V_{i,j} + \sum_{i < j < m} V_{i,j,m} + \dots + V_{1,2, \dots, k}$$

Siendo la varianza parcial de un único factor:

$$V_i = V[E(Y|X_i = x_i^*)]$$

Y la varianza parcial de la combinación de varios factores:

$$V_{i,j} = V[E(Y|X_i = x_i^*, Y|X_j = x_j^*)] - V[E(Y|X_i = x_i^*)] - V[E(Y|X_j = x_j^*)]$$

Si dividimos cada varianza parcial V_1, V_2, V_3, V_4 y V_5 entre $V(Y)$ obtenemos los Efectos Principales o Índices de Varianza de Primer Orden. La interpretación de estos es sencilla. Por ejemplo VX_1 nos indica la proporción de varianza es explicada por el factor de aleatoriedad por sí mismo.

$$S_i = V_i / V(Y)$$

Con el resto de los índices ocurre lo mismo. Si dividimos $V_{1,2}$ entre $V(Y)$ nos da la proporción de varianza explicada por la interacción del factor de aleatoriedad (X_1) con el factor de accesibilidad (X_2) (y viceversa). Para los Índices Totales, basta con sumar estas varianzas.

3. RESULTADOS

Aplicando este análisis tan sólo a las zonas que cambiaron de uso durante el periodo simulado (2018-2050), como en los trabajos anteriormente referenciados, se comprueba una incidencia mayor de algunos factores de manera individualizada. Concretamente hasta el 87% de la variación de los resultados en el caso del uso residencial unifamiliar sería atribuible al factor vecindad, y éste junto con el factor de adecuación serían los responsables de entre el 62 y el 74% de la variación en el resto de los usos. Las diferencias con los índices de sensibilidad total confirmarían esta ausencia de interacción, no observándose valores superiores a 0,2, excepto en la adecuación y la vecindad para el Total Urbano y la accesibilidad en el uso industrial (siempre inferior a 0,3). Como podemos comprobar en la figura 1, estos resultados no podrían servir para realizar una simplificación del modelo, pues en los resultados con tan solo esos dos parámetros se observan diferencias notables en algunas partes del área de estudio respecto a los resultados simulados con todos los parámetros (especialmente en el caso del uso industrial y unifamiliar).

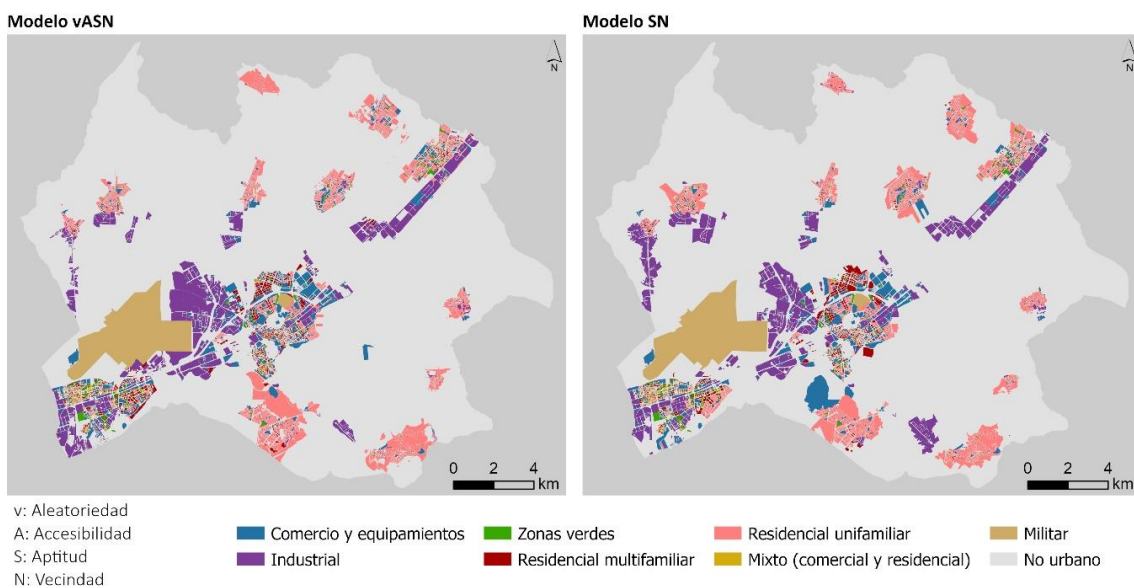


Figura 1. Mapas de usos del suelo obtenidos de la simulación con los modelos vASN (aleatoriedad, accesibilidad, aptitud y vecindad) y SN (aptitud y vecindad).

Dadas las características de este nuevo modelo, resultaría más apropiado realizar este análisis teniendo en cuenta toda el área de estudio, ya que en la simulación todas las parcelas son susceptibles de ser modificadas, pudiendo cambiar aquellas que ya presentan un uso definido a otro uso, incluyendo su conversión a vacante (no urbano), bajo ciertos parámetros y condiciones. En este caso, los resultados de los análisis de sensibilidad arrojan que todos los factores tienen una incidencia mínima de manera individual en la variación de los resultados en todos los usos y en el Total Urbano (tabla 1); tan solo el factor vecindad llega, en el caso de suelo industrial, a acumular el 25% de la variación, estando todos los demás resultados por debajo del 10%. Respecto al índice de sensibilidad total, se comprueba que las diferencias respecto a los primeros no son en ningún caso superiores a 0,2 (caso que no ocurre en los resultados obtenidos para las parcelas que crecieron en el periodo simulado (2018 – 2050) representados en la tabla 2), lo que nos indica la importante interacción de todos los factores, siendo todos relevantes en la aplicación del modelo.

Tabla 1. Efectos principales (individuales) y efectos totales para el total de parcelas.

Modelo	Precisión del productor					Precisión total
	Comercial	Industrial	Mixto	Multifamiliar	Unifamiliar	Total urbano
Estocasticidad	0,12	0,06	0,07	0,08	0,05	0,05
Accesibilidad	0,03	0,09	0,07	0,08	0,10	0,08
Aptitud	0,19	0,10	0,07	0,08	0,09	0,09
Vecindad	0,18	0,25	0,07	0,11	0,13	0,15
\sum Estocasticidad	0,52	0,28	0,49	0,38	0,53	0,41
\sum Accesibilidad	0,44	0,56	0,05	0,38	0,53	0,54
\sum Aptitud	0,53	0,43	0,56	0,40	0,53	0,50
\sum Vecindad	0,55	0,52	0,54	0,59	0,53	0,54

Tabla 2. Efectos principales (individuales) y efectos totales para parcelas que crecieron en el periodo simulado (2018 – 2050).

Modelo	Precisión del productor			Precisión total		
	Comercial	Industrial	Mixto ¹	Comercial	Industrial	Total urbano
Estocasticidad	0,00	0,00	-	0,00	0,02	0,03
Accesibilidad	0,06	0,06	-	0,06	0,00	0,00
Aptitud	0,43	0,04	-	0,43	0,02	0,23
Vecindad	0,31	0,62	-	0,31	0,87	0,42
\sum Estocasticidad	0,09	0,17	-	0,09	0,10	0,13
\sum Accesibilidad	0,20	0,30	-	0,20	0,06	0,01
\sum Aptitud	0,51	0,15	-	0,51	0,07	0,52
\sum Vecindad	0,47	0,81	-	0,47	0,91	0,71

*El uso mixto no presenta valores ya que no experimentó crecimiento entre 2018 y 2050.

4. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta que en la ejecución del modelo un total de 9.893 parcelas ya ocupadas con un uso urbano cambiaron de uso (algo más del 13% de la superficie del área ya urbanizada), parece razonable atender a los resultados del análisis de sensibilidad resultante y considerar, por una parte, que los cuatro factores están teniendo una incidencia equilibrada en los resultados y, por tanto, todos ellos son relevantes y necesarios. Por otro lado, podemos concluir que los resultados del modelo pueden ser validados y considerados suficientemente robustos, pues no se observan grandes variaciones en los resultados.

5. REFERENCIAS

- Barreira-González, P., Aguilera-Benavente, F., & Gómez-Delgado, M. (2015). Partial validation of cellular automata based model simulations of urban growth: An approach to assessing factor influence using spatial methods. *Environmental Modelling and Software*, 69, 77–89. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.03.008>
- Molinero-Parejo, R., Aguilera-Benavente, F., Gómez-Delgado, M., & Shurupov, N. (2023). Combining a land parcel cellular automata (LP-CA) model with participatory approaches in the simulation of disruptive future scenarios of urban land use change. *Computers, Environment and Urban Systems*, 99. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2022.101895>
- Urgilez Clavijo, A., Gómez Delgado, M., & Barreira González, P. (2019). Análisis de Sensibilidad aplicado a modelos de crecimiento urbano basados en autómatas celulares de estructura irregular. *Cuadernos Geográficos*, 58(3), 326–348. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v58i3.7842>
- White, R., Engelen, G. and Uljee, I. (1997). The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land use dynamics. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24, 323-343.

4.5. APLICACIÓN DE MÉTRICAS ESPACIALES PARA LA CARACTERIZACIÓN DE ESCENARIOS

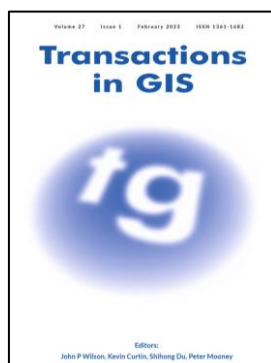
RESUMEN

La simulación de escenarios futuros mediante técnicas de modelización se ha utilizado ampliamente en combinación con la planificación de escenarios para analizar la evolución de los usos del suelo urbano. Sin embargo, a pesar de su indudable potencial, se invierte poco tiempo y esfuerzo en la caracterización, evaluación y comparación de estos escenarios una vez simulados. Además, la proliferación de modelos de AC basados en vectores ha provocado un aumento de la demanda de técnicas de análisis de mapas vectoriales de usos del suelo. En este marco, las métricas espaciales de ventana móvil son una herramienta útil para extraer información precisa de los mapas de uso del suelo simulados sobre la diversidad y los patrones de expansión urbana. Este trabajo tiene dos objetivos principales, readaptar las técnicas espaciales existentes a los nuevos requisitos y obtener información cuantitativa precisa para caracterizar y comparar escenarios futuros simulados. Para ello, se desarrollaron e implementaron vSHE y vLEI, dos métricas de composición y configuración que utilizan ventanas móviles vectoriales para calcular la diversidad y los tipos expansión urbana a diferentes escalas. Se aplicó esta metodología al Corredor del Henares (España). Los resultados demuestran el potencial de combinar métricas espaciales de caracterización de patrones urbanos en mapas de usos del suelo basados en parcelas. Esta metodología facilita la comparación de escenarios futuros y ofrece una caracterización más detallada que la aportada por las propias narrativas. La información proporcionada por esta metodología ofrecerá a los responsables de la toma de decisiones una mejor comprensión de las diferentes vías futuras hacia un escenario deseado.

PALABRAS CLAVE

Scenario; simulation; spatial metrics; vector data; urban land use.

Molinero-Parejo, R., Aguilera-Benavente, F., & Gómez-Delgado, M. (2021). *Characterisation and comparison of simulated urban scenarios applying vector moving windows metrics. Case study of the Henares Corridor (Spain)*. Transaction in GIS. En revision.



Revista	Transactions in GIS
Editorial	Wiley
Tipo	Open Access / Suscripción
Categorías relacionadas	Geografía, Planificación urbana y regional
Cuartil JIF	Q2
Factor de impacto (5 años)	2,904

CHARACTERISATION AND COMPARISON OF SIMULATED URBAN SCENARIOS APPLYING VECTOR MOVING WINDOWS METRICS

1. INTRODUCTION

Urbanisation is a global change phenomenon that causes significant and irreversible impacts on the environment which are visible at different scales (Aguilera et al., 2011; Deng et al., 2009; Grimm et al., 2008). The rapid, sometimes uncontrolled, urban growth experienced in the last century will remain one of the main challenges facing urban planning (Bettencourt & West, 2010; Hou et al., 2019). In Spain there has been remarkable urban growth in recent decades, as manifested most obviously in the “housing bubble” which burst in 2007-2008 (Burriel, 2011). In the period 2001-2020, the area covered by large cities increased by 19.29%, while the area covered by small towns increased even more by 23.87% (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2021).

In this context, the important role played by urban areas in the sustainable development of land must be supported by the design and implementation of innovative tools to enable the best possible management of these areas. One such tool is urban scenario planning (Chakraborty & McMillan, 2015; Goodspeed, 2020), which considers diverse futures of urban dynamics through creative and exploratory methods (Soria-Lara et al., 2021), such as urban growth or land use change (Aguilera Benavente et al., 2010; Barredo et al., 2004; Plata Rocha et al., 2011; Wang et al., 2021; White et al., 2004). This methodology is primarily based on the design, building, assessment, and comparison of scenarios, and enables users to identify the problems and forces that shape urban areas under multiple possible futures (Hopkins & Zapata, 2007). Furthermore, out-of-the-box thinking needs to be integrated into the design of scenarios. As we have seen in the global situation in recent years, unexpected events (Brexit, COVID-19, the war in Ukraine, etc.) are likely to influence the future of urban areas. Thus, the design of a variety of different, disruptive scenarios can help deal with uncertainty more effectively.

The main outputs of spatially explicit scenario simulations are land use maps, which offer helpful information that is easily understandable, and from which a high volume of information can be extracted through spatial analysis, such as land use configuration and composition (Ritsema van Eck & Koomen, 2008). In particular, the comparison of future spatially explicit scenarios is one of the basic tools for controlling urban sprawl (Hennig et al., 2016) and for discussing the similarities and differences in urban diversity between the different future pathways (Rueda Palenzuela et al., 2022). In general terms, as Herold et al. (2005) state, scenario comparison is an essential step in the planning process, as it provides a better understanding of how different planning decisions may affect natural and urban areas. Therefore, in addition to the land use maps for each scenario, this approach also offers insights that help us understand, evaluate, and characterise said scenario, so as to enable us to take appropriate action to deal with a particular future situation.

Various issues can be explored using this approach, including land use mix (LUM) and urban growth patterns. This is especially relevant in Spain, where the policies adopted to comply with the *Urban Agenda for the EU and the UN 2030 Agenda* have focused their efforts on sustainable urban development through the pursuit of urban diversity and efficient management of urban expansion, among other aspects. As a result, both the creation of a diverse urban environment (Rueda Palenzuela et al., 2022) and the control of urban sprawl (Díaz-Pacheco & García-Palomares, 2014) have become important topics on the spatial planning agenda in Spain. However, most existing studies have focused on the analysis and description of past urban growth processes, rather than exploring the possible future situations that can be obtained from scenario

analysis, which can assist in the design of proactive policy packages adapted to these scenarios (Ariza-Álvarez et al., 2023).

Spatial metrics is one of the most important methods for studying the patterns of spatial categorical maps and their spatial composition and configuration, and as such has been widely used to describe and characterise the spatial properties of land use maps (McGarigal, 2012; Ritsema van Eck & Koomen, 2008; Wu et al., 2020), so helping assess urban patterns of future scenarios (Arora et al., 2021; Herold et al., 2005; Ritsema van Eck & Koomen, 2008).

Most studies applying spatial metrics to assess future urban land use scenarios work with raster data. This is because raster has traditionally been the most commonly used output data format in urban simulation models (Aguilera et al., 2011; Barredo et al., 2004; Herold et al., 2005), and is easier and faster to compute than vector data (Wade et al., 2003; Yao et al., 2022). However, the significant proliferation of vector-based CA models (Abolhasani et al., 2016; Barreira-González et al., 2019; Molinero-Parejo et al., 2023; Moreno et al., 2008; Yao et al., 2017, 2021) has increased the need for new tools for spatial metrics calculation with vector data. The most recent vector-based tools include Arc-LIND (Yu et al., 2019), PolyFrag (Maclean & Congalton, 2013) and VecLi (Yao et al., 2022), possible alternatives to FRAGSTAT (McGarigal et al., 2012), which only uses raster data.

However, new methods are also required, such as vector moving window metrics, which must be further developed. This method uses a window that moves across the landscape analysing land use parcel by parcel and allocating a metric value to each one. This allows spatial variations to be reflected across a continuous surface, better matching the heterogeneity of the real landscape. Although it is widely used in landscape metrics with raster data, work must still be done to adapt it to vector. Adapting spatial metrics to this format is useful because it avoids possible errors and resolution loss when converting vector data to raster data (Wade et al., 2003) and offers more realistic spatial patterns than in raster format (Yao et al., 2022). This is particularly relevant in vector-based simulation models, which use parcels as the spatial unit. Therefore, redesigning existing raster metrics to be implemented on vector data is an essential step to extract accurate information from the urban landscape and to assess the results of urban land-use maps obtained through modelling techniques.

In this research, we implemented two adapted spatial metrics: vector Shannon Evenness Index (vSHEI) and vector Landscape Expansion Index (vLEI). These were calculated through moving-windows and were used to assess future urban land use scenarios. Within the framework of the landscape gradient approach (Frazier & Kedron, 2017; Mcgarigal & Cushman, 2005), these metrics allow us to obtain continuous surfaces on which to analyse spatial changes in the metric.

Hence, this article has two main objectives. It seeks, firstly, to adapt multiscale spatial metrics to vector format using moving windows that can capture realistic patterns of urban growth and diversity, and, secondly, via the combined implementation of these spatial metrics, to characterise and compare vector urban land-use maps representing three simulated disruptive future scenarios for the Henares Corridor (Spain) for 2050. This methodology allows us to test the usability of the metrics and facilitates comparison of the simulated scenarios, in addition to determining whether the three scenarios have successfully captured the diversity and urban growth patterns established in the initial narrative storylines. This novel contribution to disruptive future scenarios seeks a better understanding of different futures to ensure that the relevant actors have more, better-quality information during the decision-making process.

The paper is divided into four sections. After this introduction, we provide a detailed description of the study area and the simulated scenarios. We then set out the methodology for measuring urban diversity and urban sprawl, which is based on vector moving window metrics. This is

followed by the presentation of results and a discussion of the contributions made by this research. It ends with brief concluding remarks.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. STUDY AREA AND DATA

As a study area, we focused on part of the Henares Corridor in the Functional Urban Area of Madrid, Spain (Fig. 1). The study area covers several municipalities with a total population of 417,773 inhabitants (National Statistics Institute, 2018). It is characterised by small and medium-sized towns with significant industrial fabric and a variety of territorial and social dynamics (Barreira-González et al., 2019; Cantergiani & Gómez-Delgado, 2020). It is an interesting area to study due, in particular, to the strong dynamics of urban sprawl and growth in recent decades, and the presence of areas that are still underdeveloped, but which are currently undergoing very fast, major changes in their urban morphology. The large municipalities tend to attract the smaller ones towards them, which combined with their accessibility, as determined by the topography and the road network, is leading to a heterogeneous, imbalanced evolution of the Henares Corridor.

From cadastral data, we obtained parcel-level land use for seven categories: Commerce and utilities, industrial, single-family residential, multi-family residential, mixed (residential and commercial), green zones, and military areas. In Spain, a land parcel may contain several buildings, and each of these buildings may contain different functions (housing, office, retail, etc.). We therefore decided to include an additional “mixed” category during the classification process, particularly important when referring to urban diversity.

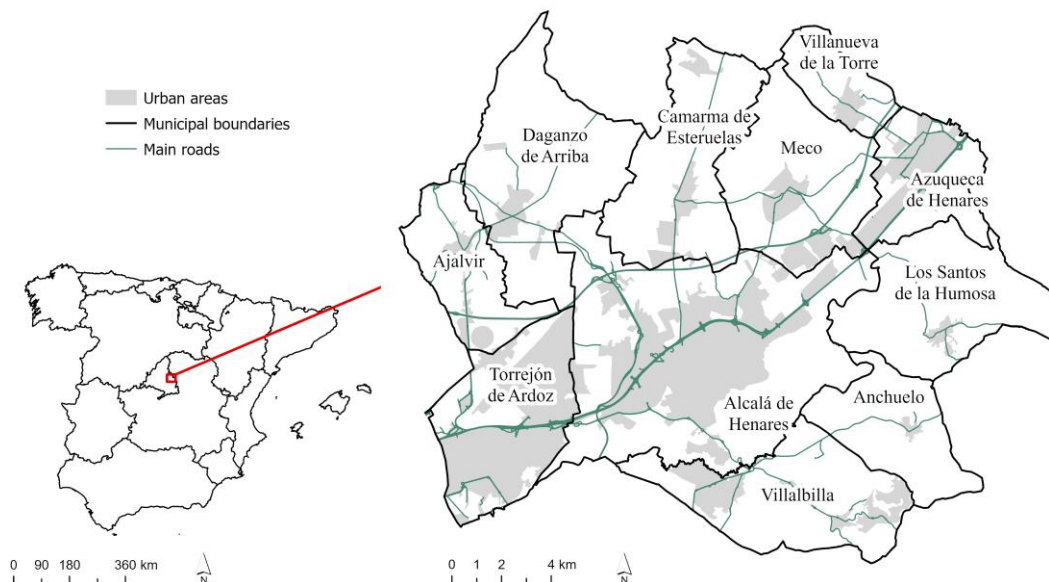


Figure 1. Study area. Part of the Henares Corridor (Spain).

2.2. DESIGN AND MAPPING OF FUTURE URBAN LAND USE SCENARIOS

We start from three different future disruptive narrative storylines of urban land use change and transport describing the main characteristics of each scenario (Molinero-Parejo et al., 2021; Soria-Lara et al., 2021), as summarised in Table 1. The different levels of plausibility and the remarkable

differences in their content, particularly in terms of land use diversity and type of growth, make them particularly relevant to this research.

Narrative storylines describing possible future scenarios are useful for generating ideas and strategies as to the way the future may evolve (Mallampalli et al., 2016). By comparing them we can identify the most outstanding characteristics of each one, and assess whether the differences between the narratives in terms of diversity and type of growth are accurately simulated. This comparative analysis is one of the main purposes of modelling in urban planning as it allows the visualization of possible urban growth trajectories. (Herold et al., 2005; Xiang & Clarke, 2003). These narrative storylines were then converted into quantitative scenarios using simulation techniques in order to provide numerical support for the statements extracted from the narrative storylines and make it easier to distinguish between them.

The spatially explicit future urban scenarios were obtained by simulating the three narrative storylines with the Land Parcel Cellular Automata (LP-CA) model (Molinero-Parejo et al., 2023). The main formula of the transition potential is determined by a combination of several factors. The probabilistic formula is represented in Equation 1 as follows:

$$P_{i,k}^t = v \cdot A_i \cdot S_{i,k} \cdot Z_i \cdot N_{i,k,d}^t \quad (1)$$

where $P_{i,k}^t$ is the potential for parcel i to undergo a transition to an urban land use k in a time t , v is the stochastic perturbation term, A_i is the accessibility in parcel i , $S_{i,k}$ is the suitability in parcel i for land use k , Z_i is the zoning in parcel i and $N_{i,k,d}^t$ is the neighbourhood effect between parcel i for urban land use k within a time t and the adjacent parcels within a buffer at a distance d .

Table 1. Highlights of the narrative storylines.

Narrative	Highlights
Non-motorized city centres	<ul style="list-style-type: none"> • Full restriction of private vehicles to city centres. • All public space in city centres is recovered for active mobility and for the creation of socialisation areas. • High mix of residential, shopping, leisure, and working places. • Periphery working places would be transformed into more multifunctional areas. • A dense network of green corridors will connect different places.
Overpopulation	<ul style="list-style-type: none"> • Population increases drastically due to international demographic flows caused by climate change. • Increase use of collective modes for work commuting. Walking and cycling rates to shopping and leisure locations. • Low density residential areas, but with a high mix of use in the periphery. • High-density residential areas in city centres. • Dense green network of corridors would connect different places.
High level of insecurity in urban areas	<ul style="list-style-type: none"> • High level of insecurity in urban areas because of increasing social inequalities. • Central neighbourhoods relegated to commercial uses and low-income housing. • Private car dominating all daily trips. • Periphery occupied by low-density dwelling. • Highly segregated land uses in homogenous areas connected by motorised infrastructure. • Urban green spaces would be relegated to car infrastructure.

The LP-CA model simulates five active land uses: Commerce and utilities, industrial, single-family residential, multi-family residential and mixed. The maps obtained from the simulations show the new configuration of urban land uses at parcel level (Fig. 2). Table 2 shows the total urbanised area for the study area in 2050 and the growth over the simulated period (2018-2050) for each scenario (Table 2).

Table 2. Total urbanised area (ha) of the three simulated scenarios.

	Urban land use	Non-motorized city centres	Overpopulation	High level of insecurity in urban areas
Total (2050)	Commercial	1174.11	1064.58	997.59
	Industrial	2210.91	1998.34	2174.47
	Res. Single-family	1499.66	1950.63	2051.93
	Res. Multifamily	506.40	484.08	424.24
	Mixed	94.69	97.15	75.11
Growth (2018-2050)	Commercial	290.89	309.73	181.49
	Industrial	758.52	830.95	782.33
	Res. Single-family	611.25	1083.93	1198.09
	Res. Multifamily	167.22	163.21	130.01
	Mixed	18.53	30.06	0.00

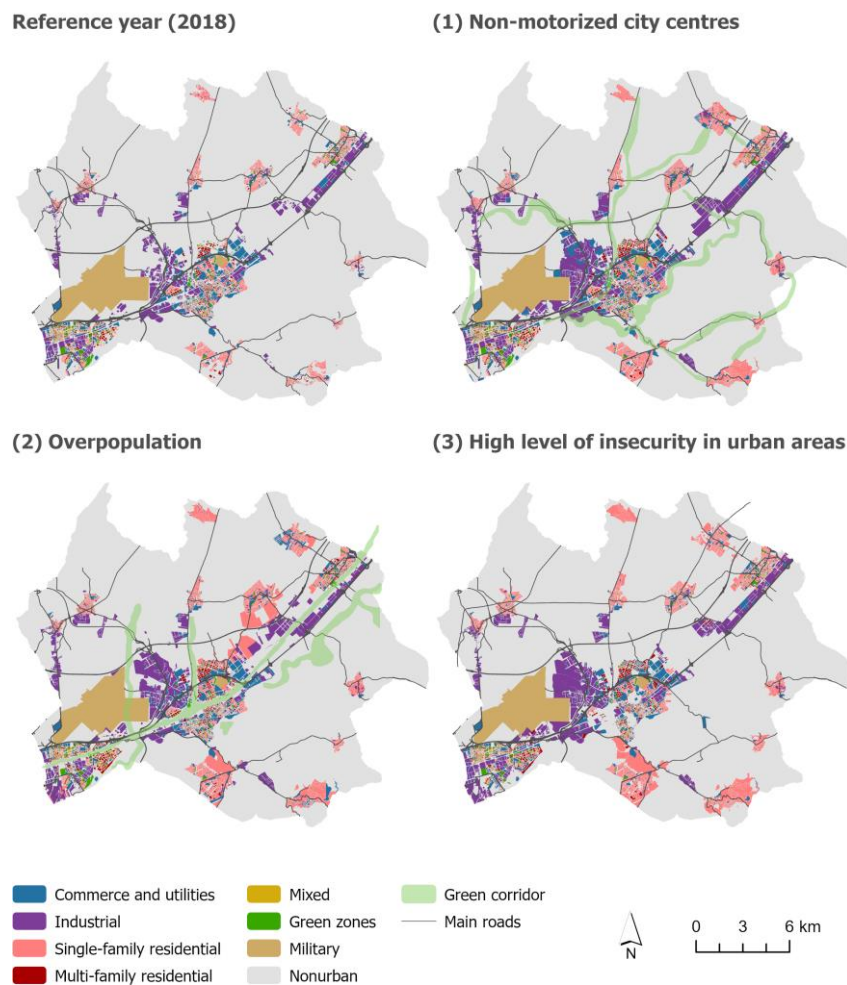


Figure 2. Urban land use maps of the study area in three future scenarios and reference year.

2.3. VECTOR MOVING WINDOW METRICS TO ASSESS FUTURE URBAN SCENARIOS

Within the framework of the landscape gradient model (Mcgarigal & Cushman, 2005) and its advantages when reflecting real variations in spatial heterogeneity (Frazier & Kedron, 2017), this research implemented two vector spatial metrics calculated through moving windows. They analyse the area around the focus parcel, providing a local value for each adjacent parcel. Even in urban landscapes, where human activities may present a clearly defined categorical configuration, this model is a significant leap forward that enables a more accurate, more realistic representation of urban patterns (Luck & Wu, 2002; Vizzari & Sigura, 2013).

In this context, we should mention some of the vector-based programs that can be used for computing landscape metrics. PolyFrag computes basic landscape fragmentation metrics oriented towards land cover maps, while Arc_Lind computes 195 landscape metrics at patch, class, and landscape level for spatial pattern analysis. Both are ArcMAP plug-ins, tools for a non-open-source software. A more recent development is VecLi, an open-access software for vector-based landscape indices which allows GIS and landscape design researchers to compute spatial metrics at parcel, class, and landscape level. However, despite the significant advances made by such tools in this field, further progress is required to be able to study the urban landscape at a local scale. In this research, we develop and implement vLEI and vSHEI at parcel level, using two vector-based moving window metrics to quantify structure and pattern in urban land use maps.

vSHEI, also known as Shannon Entropy (Cabral et al., 2013; Zachary & Dobson, 2020), is a composition metric that measures the diversity of land use categories through the heterogeneity and abundance of each category in a defined area, while vLEI is a configuration metric that measures the spatial distribution of new urban parcels in order to identify urban growth patterns (Liu et al., 2010). This advance is intended to complement existing functionalities, as neither of these metrics are available in the aforementioned software packages. The open-source code, developed in Python programming language, is freely available for download at <https://github.com/ramon-mp/Vector-Spatial-Metrics>.

Measurement of the urban diversity through vSHEI

Urban diversity is a measure of the concentration of different activities in a specific area, so indicating its degree of multifunctionality (Rueda-Palenzuela, 2022). The most popular approach to studying urban diversity in cities is through LUM analysis (Abdullahi et al., 2015; Eom et al., 2020; Iannillo & Fasolino, 2021; Yang et al., 2021). Some of the most commonly used diversity measures include Gini Index (Gini, 1921), Simpson Index (Simpson, 1949), Shannon Diversity Index and Shannon Evenness Index (Shannon & Weaver, 1949). These indices were developed by researchers in the field of ecology, primarily to study how species biodiversity contributed to ecosystem functioning (Baumgärtner, 2006). In this paper, we use vSHEI to obtain heterogeneity values for each parcel. It is an integrated method which evaluates land uses symmetrically in up to three dimensions (Song et al., 2013). It is one of the most commonly implemented indices in urban diversity analysis (Bordoloi et al., 2013) and has a simple intuitive range (0.0 to 1.0), making it easy to compare with other metrics and allowing for straightforward comparison between scenarios. The formula is as follows (Equation 2):

$$vSHEI = - \left[\sum_j^k P_j \cdot \ln(P_j) \right] / \ln(k) \quad (2)$$

where P_j is the proportional abundance of the land use type j , and k is the number of land use types.

The first stage of any analysis of urban diversity is to identify the most appropriate scale, as nearby land uses can influence each other within a specific spatial range (Song et al., 2013). The

importance of geographic scale in territorial processes is evident (Fujita & Ois Thisse, 1996), and scale dependency is a fundamental characteristic of the urban landscape (Wu et al., 2020). However, there is no specific distance for analysing diversity in the organisation of spatial elements in urban areas. A multiscale analysis is therefore recommended, as this enables us to identify the distance above which the diversity values no longer reflect the reality on the ground when analysing the spatial diversity of a given area (Díaz-Varela et al., 2009, 2016).

In this research, we implement the proposed methodology for calculating vSHEI using a moving window at different scales, representing the range of influence for the land parcel with a buffer distance value. In addition, to detect the effects of scale observable as the size of the moving window is increased, we applied the method proposed by Diaz-Varela et al., (2009). The first stage is to calculate how vSHEI responds to the change in scale. For this purpose, we use dissimilarity (S), a measure of the difference between the results, which is calculated using the following formula (Equation 3):

$$S = \frac{M_{100} - M_i}{SD_{100}} \tag{3}$$

where M_{100} is the average value of an index for a map generated with a 100 m \varnothing window, M_i is the average value of an index for a map generated with other windows, and SD_{100} is the standard deviation of an index value for a map generated with a 100 m \varnothing window.

The following formula (Equation 4) has been applied to quantify the difference between the value of the dissimilarity (variation in S) for each distance value:

$$p_i = \left| \frac{\Delta V_i}{\Delta W_i} \right| \tag{4}$$

where p_i stand for the variation of the slope of the curve of S , ΔV_i is the percentage increase in the values of S with respect its maximum value with each change in window size (thus change in scale), ΔW_i is the percentual increase in moving-window sizes, and i is each increment in scale.

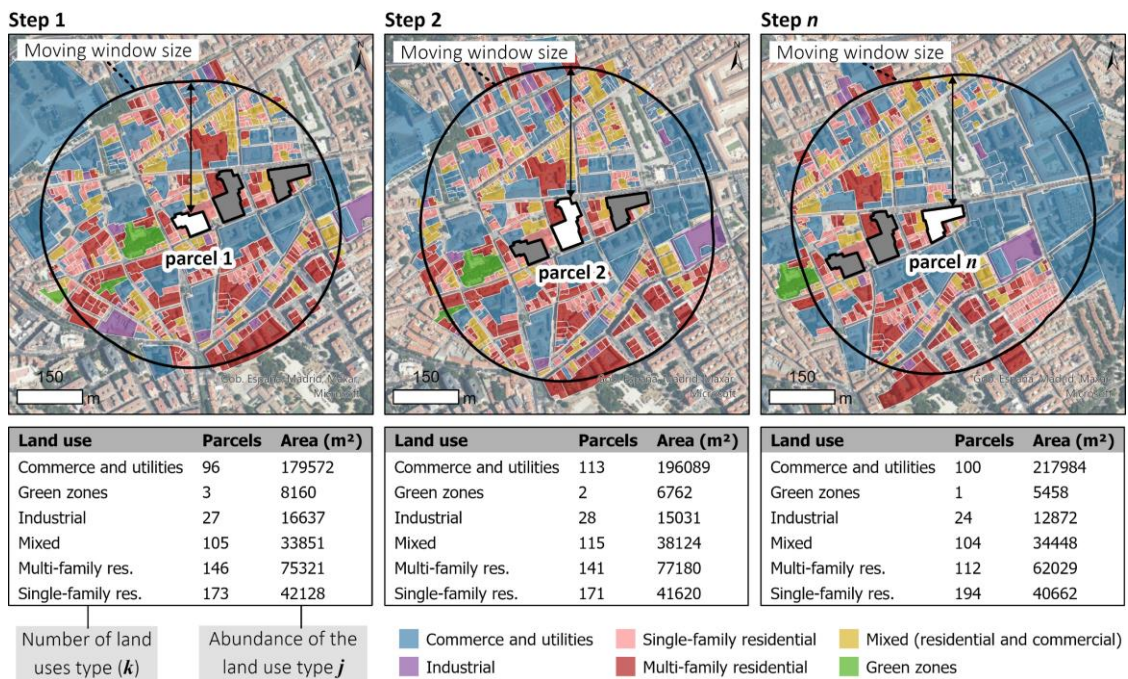


Figure 3. Scheme of the vSHEI calculation method using moving windows applied to vector datasets.

The moving window size where $p_i < 0$ marks the threshold beyond which heterogeneity becomes progressively less scale-dependent. This break-even point where $p_i = 0$ is chosen as the scale (moving window size) for vSHEI computation (see section 3.1).

Once the moving window size has been set, vSHEI can be calculated for each parcel. The calculation is made on a parcel-by-parcel basis. For each parcel, a moving window with the set size (designed as a buffer) is generated that identifies all the parcels with which it intersects (Fig. 3). It summarises the total area for each land use and the total area within the moving window. Once it has calculated the area for each land use and the number of land uses observed, it computes the diversity value and assigns it to the respective parcel. The moving window then moves on to the next parcel and the process is repeated for all the parcels in the study area.

Measurement of the urban expansion pattern through vLEI

Another key component in the assessment of future scenarios is the spatial pattern of urban growth. If we can identify the dominant spatial pattern, we can find out whether urban growth is scattered or concentrated in certain areas (Aguilera et al., 2011). When land parcels are used in the calculation of spatial metrics, the real urban form of the city is integrated into the analysis and the results are more realistic.

Urban expansion takes place according to different types of spatial patterns (Camagni et al., 2002; Liu et al., 2010; Wilson et al., 2003; Xu et al., 2007). These vary depending on where new growth takes place in relation to existing urban areas. Liu et al. (2010) identified the following: a) infilling i.e., where the gaps between existing built-up parcels are filled up with newly developed parcels, b) edge expansion i.e., where newly developed parcels spread into urban areas adjacent to non-urbanized areas, and c) outlying or spontaneous growth i.e., where newly developed parcels isolated from the rest of the built-up parcels form a new patch of urban land.

vLEI was used to identify the dominant urban growth patterns. vLEI is calculated using moving window analysis. Usually, the buffer size is approximately equal to or smaller than the spatial resolution (Liu et al., 2010). Other authors prefer a buffer size approximately equivalent to the mean width of the road network (Jiao et al., 2015). In Spain, the width of the road network depends mainly on the type of road, the number of lanes and the maximum authorized speed. Some roads in old cities are only about 5 m wide, while motorways can be over 100 m wide. Given that the vector data we analysed have no fixed scale or resolution and considering the recommendations of Jiao et al. (2015), we used a buffer size of 50 m to calculate vLEI. The formula is as follows (Equation 5):

$$vLEI = \frac{A_o}{A_o + A_v} \quad (5)$$

where A_o is the intersection between the buffer zone and the urban parcels and A_v is the intersection between the buffer zone and the nonurban areas.

In order to identify the types of urban expansion, we used the vLEI ranges used by Liu et al., (2010). Newly developed parcels with values of between 0.5 and 1.0 are considered as infilling. Newly developed parcels with values of between 0 and 0.5 are considered as edge expansion. Finally, newly developed parcels with values of 0 are considered as outlying. vLEI is calculated according to the urban areas existing in 2018, considering parcels rather than patches. If a developed parcel has no other urban parcels from the reference year within less than the defined buffer size, it is considered outlying.

The method for calculating vLEI is similar to that used for vSHEI. In this case, the moving window is smaller (50m), as it is trying to identify adjacent parcels, including those separated by

streets within a distance appropriate to the study area (Fig. 4). It summarises the total built-up area, the total vacant area, and the total area within the moving window. In this way, it computes the vLEI value and assigns it to the respective parcel.

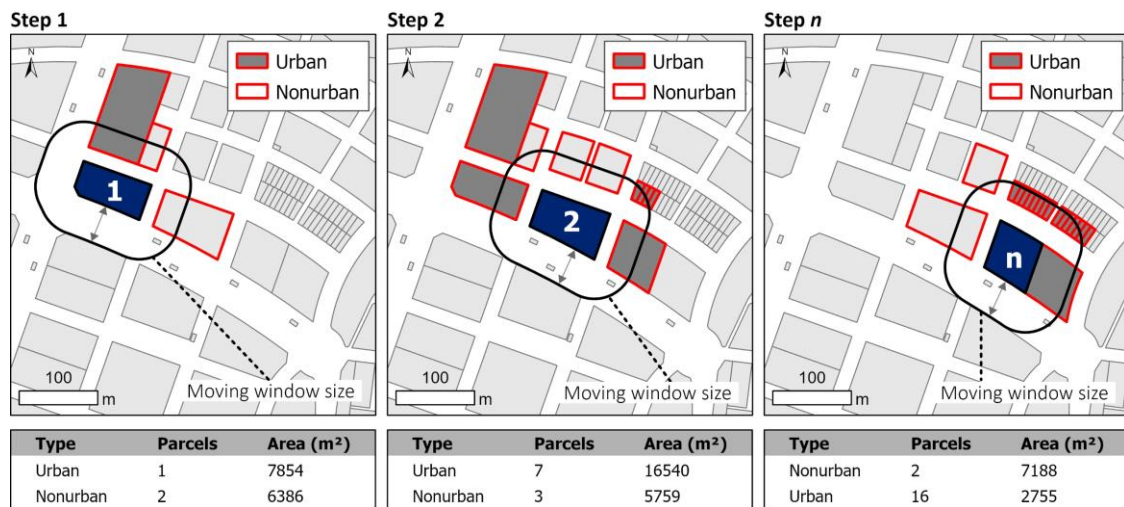


Figure 4. Scheme of the vLEI calculation method using moving windows applied to vector datasets.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. SETTING THE OPTIMAL MOVING WINDOW SIZE FOR vSHEI

vSHEI was calculated for a total of 11 different buffer sizes (up to 800 m). Results were obtained for both the total study area and for the areas where land use changed in the simulated period for the three future scenarios. Fig. 5 shows the average distribution of the urban diversity values calculated for the different buffer sizes. As the buffer size increases, so does the vSHEI value. This trend is clear and consistent up to 300 m. Above this distance, the vSHEI value tends to homogenise. We therefore chose 300 m as the most suitable buffer size for the diversity calculation and as the threshold that distinguishes the microscale (< 300 m) from the mesoscale (> 300 m) given the size of the subregional study area (376 km²) (Díaz-Varela et al., 2009).

The scale effect on vector spatial metrics is a critical issue in this research. Geographic scale must be considered in territorial processes (Fujita & Ois Thisse, 1996), and scale dependency is an intrinsic characteristic of the urban landscape (Wu et al., 2020b). In this regard, the vector moving window metric implemented here attempts to represent the distance at which certain functions of the city (parcels with a specific use) can influence each other. The buffer size is adjusted in line with the study area, the distance at which land uses can influence each other, and the scale at which the analysis is conducted. The results confirm the findings of other authors regarding the sensitivity of configuration metrics to scale variation (Díaz-Varela et al., 2009; Liu et al., 2010; Tian et al., 2022).

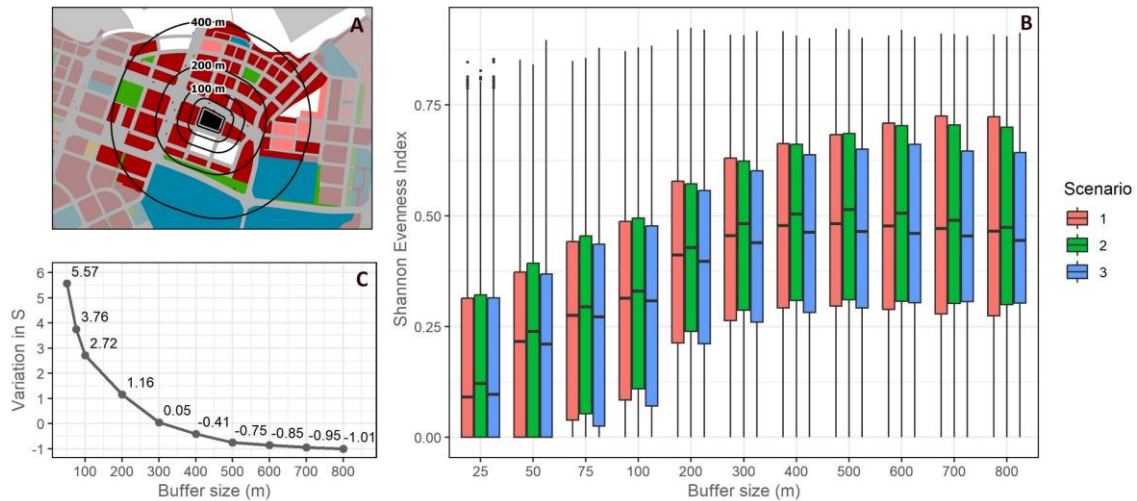


Figure 5. Moving window scheme with different buffer sizes (A). The grouped boxplot stands for the comparison of values distribution for vSHEI with different buffer sizes at different scenarios (B). The line graph below left shows the variation in S according to the buffer size (C).

3.2. CHARACTERIZATION OF URBAN DIVERSITY THROUGH VSHEI

Once we have set the moving window size, we can then obtain the vSHEI values for each parcel in three different scenarios, so allowing us to map the spatial distribution of urban diversity. Fig. 6 shows the differences in terms of spatial distribution of the three scenarios. The enlarged zone A corresponds to new growth in the periphery, while enlarged zone B corresponds to the city centre of Alcalá de Henares, the main municipality in the Henares Corridor. The areas surrounded by a dashed red line are those with the main differences in diversity patterns. The Non-motorized city centres scenario has higher diversity values, especially in the city centre, which has high population density and commercial functions, and where pedestrianization has increased walkability, so encouraging more bustling street life. The Overpopulation scenario has slightly lower values, while the High level of insecurity in urban areas scenario has values of almost nil due to the abandonment of part of the historic centre because of high rates of crime.

There is also a relationship between the transport network (road and railways) and diversity patterns. While these infrastructures tend to attract new urban developments, they do not necessarily increase urban diversity. In some cases, they create a barrier, separating areas with different degrees of LUM. They often separate multifunctional areas from purely residential developments or industrial fabric, as can be seen in the main roadway running SW-NE in the three scenarios.

Fig. 7 offers a comparative analysis of the diversity results disaggregated by land use for each scenario. It should be noted that these results have been obtained from newly developed parcels (2018-2050). Industrial use is fairly stable across all three scenarios, with maximum variations in the SHEI value of 0.02. By contrast, the greatest differences between the three scenarios can be seen in commercial use, with variations of up to 0.07. The highest average value (μ) for commercial use (0.50) is in the High level of insecurity in urban areas scenario, while the lowest value (0.43) is in the Non-motorized city centres scenario. For their part, the highest average diversity values for mixed and multi-family residential uses were obtained in the Non-motorized city centres scenario, followed by the Overpopulation scenario. This is consistent with the description in the narratives of a high mix of residential, retail, leisure facilities and workplaces. Single-family residential use also fits the narrative for the last scenario, as it has the lowest average diversity values.

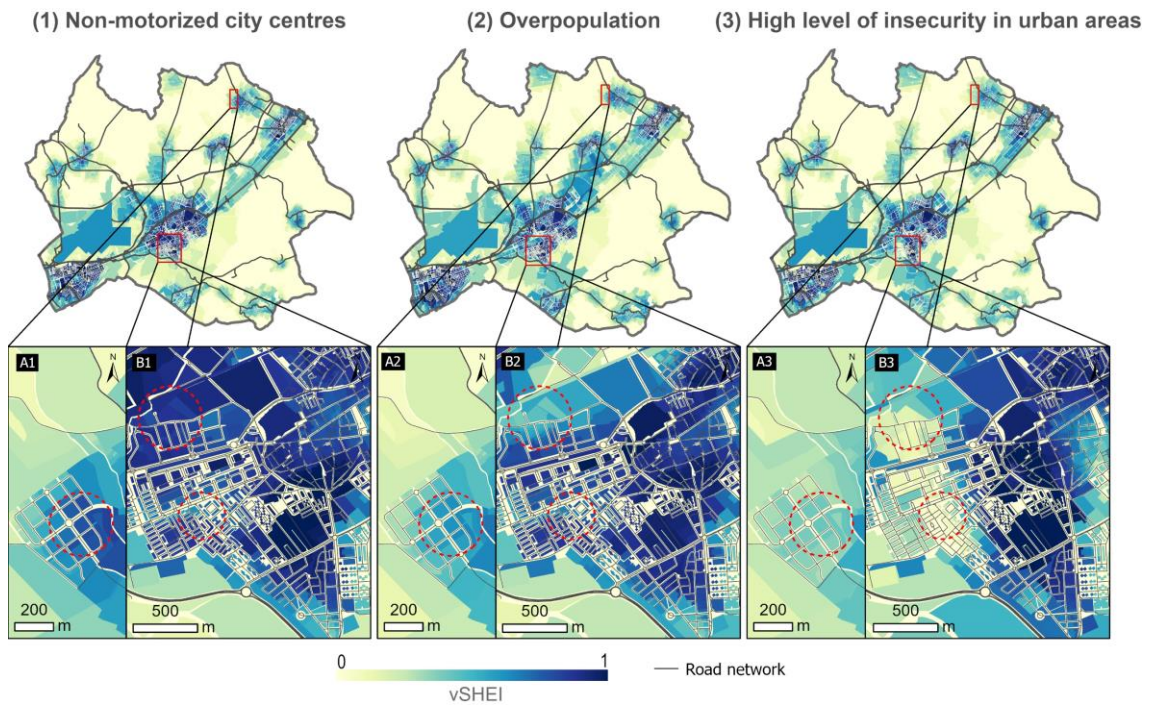


Figure 6. Spatial representation of newly developed parcels according to the degree of urban diversity calculated by vSHEI.

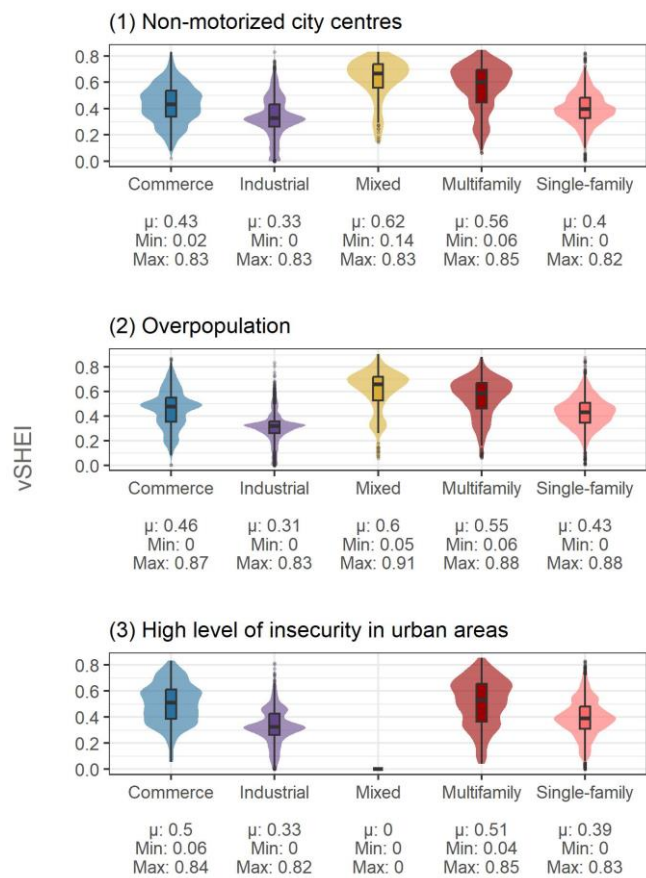


Figure 7. Distribution of newly developed parcels according to the degree of urban diversity calculated by vSHEI.

3.3. CHARACTERIZATION OF URBAN GROWTH PATTERNS THROUGH VLEI

Fig. 8 shows the area (in ha) covered by each type of growth for the five urban land uses and the three scenarios. The most remarkable finding is the massive edge-expansion growth in single-family residential use in the High level of insecurity in urban areas scenario. By contrast, in the Non-motorized city centres scenario there is only about half this much edge-expansion growth, and there is more infilling than outlying growth. In multifamily residential buildings, infilling stands out as the predominant type of growth in the Non-motorized city centres scenario. Removing vehicles from city centre streets to provide more space for pedestrians makes these areas more attractive for potential residents. This could lead to an increase in housing density as existing buildings are converted to residential use. Finally, there is very little difference in Industrial use between the Non-motorized city centres and High level of insecurity in urban areas scenarios. However, in the Overpopulation scenario, industrial use becomes more fragmented, and the edge expansion and outlying growth patterns dominate.

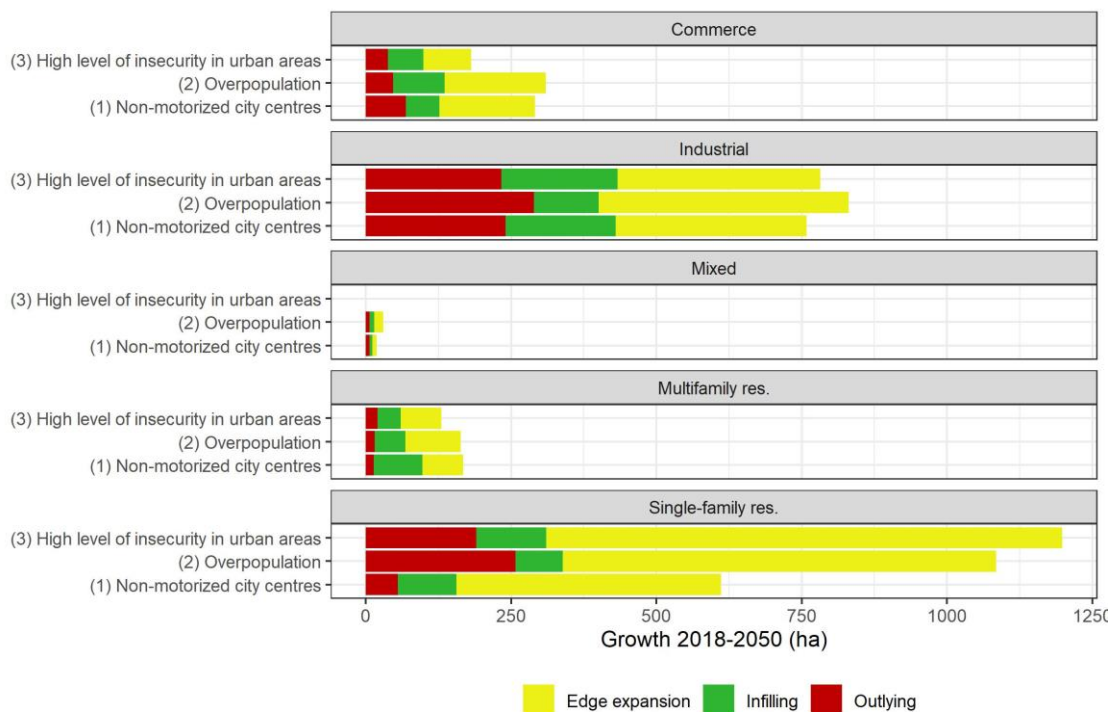


Figure 8. Classification of new developed parcels according to the type of growth pattern identified by vLEI.

We also created a categorical map to highlight the structure and distribution of the different growth patterns (Fig. 9). The dominant type of growth in all three scenarios is Edge expansion, which is shown in yellow. It is particularly significant in the High level of insecurity in urban areas scenario (B3). In this scenario, peripheral areas of the cities would be occupied by low-density dwellings. This spatial pattern is also observed in A1 (Non-motorized city centres) (Fig. 9), where there is also more infilling than in the other scenarios. Another remarkable feature of the Overpopulation and High level of insecurity in urban areas scenarios (B2 and B3, Fig. 9) is the way road network nodes attract outlying growth patterns, generating new isolated patches of urban expansion. This issue is particularly relevant in the latter scenario where the private car dominates all daily commuting.

Despite these methodological advances in the characterization of future scenarios simulated with vector data, there are still limitations in the accurate detection of outlying growth, particularly when it comes to identifying the type of urban expansion of large parcels. Some outlying parcels seem not to be clearly isolated from other parcels and are observed as a prolongation of edge expansion. This is due to discontinuities caused by roads of over 50 m wide are hardly discernible at the mapped scale. Furthermore, the calculation of vLEI only considers the reference land use map (the urban area for 2018) and does not include newly developed patches over the period 2018-2050.

In relation to the above, detecting patches using vector data of detailed urban areas is complicated due to the irregular structure of the parcels and the presence of the road network, which acts as a physical barrier. This makes it more difficult to implement spatial metrics that were originally developed for raster data.

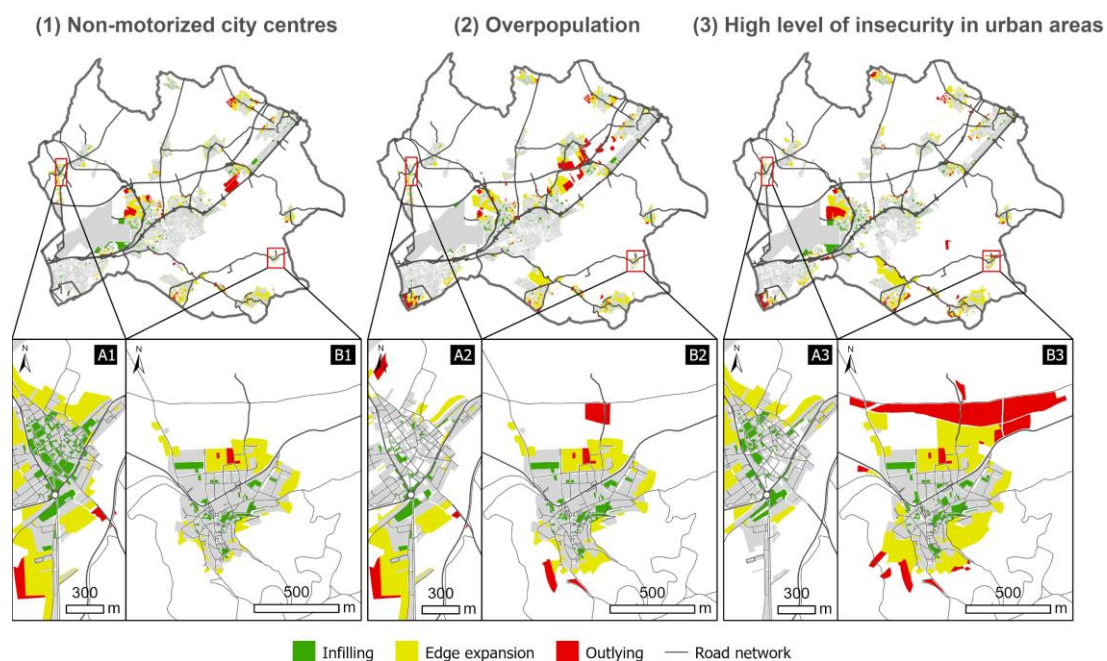


Figure 9. Spatial representation of newly developed parcels according to the type of growth pattern calculated by vLEI. Grey areas represent existing urban plots in 2018.

3.4. ANALYSING URBAN DIVERSITY AND URBAN EXPANSION PATTERNS TO ASSESS FUTURE SCENARIOS

The correlation between the diversity of urban land uses and the type of growth of urban areas for each simulated scenario can be studied using vLEI and vSHEI metrics calculated for each parcel (Fig. 10). Dividing the scatterplot into four sectors, we can classify newly developed parcels according to urban diversity patterns and urban growth patterns for each scenario. Thus, we have high-high, high-low, low-high, and low-low respectively. In most cases, a positive relationship between the two indices is observed. This means that the more concentrated the urban growth pattern, the greater the urban diversity in most situations.

Another point worth highlighting is that in the Overpopulation scenario, the residential uses (multifamily and single-family dwellings) simulated by the model coincide with those in the narrative description. This forecast the development of low-density residential areas, but with a

high mix of use in the periphery. Compared to the other scenarios, the highest percentage of newly developed parcels are in the low-high sector (low concentrated urban expansion and high diversity).

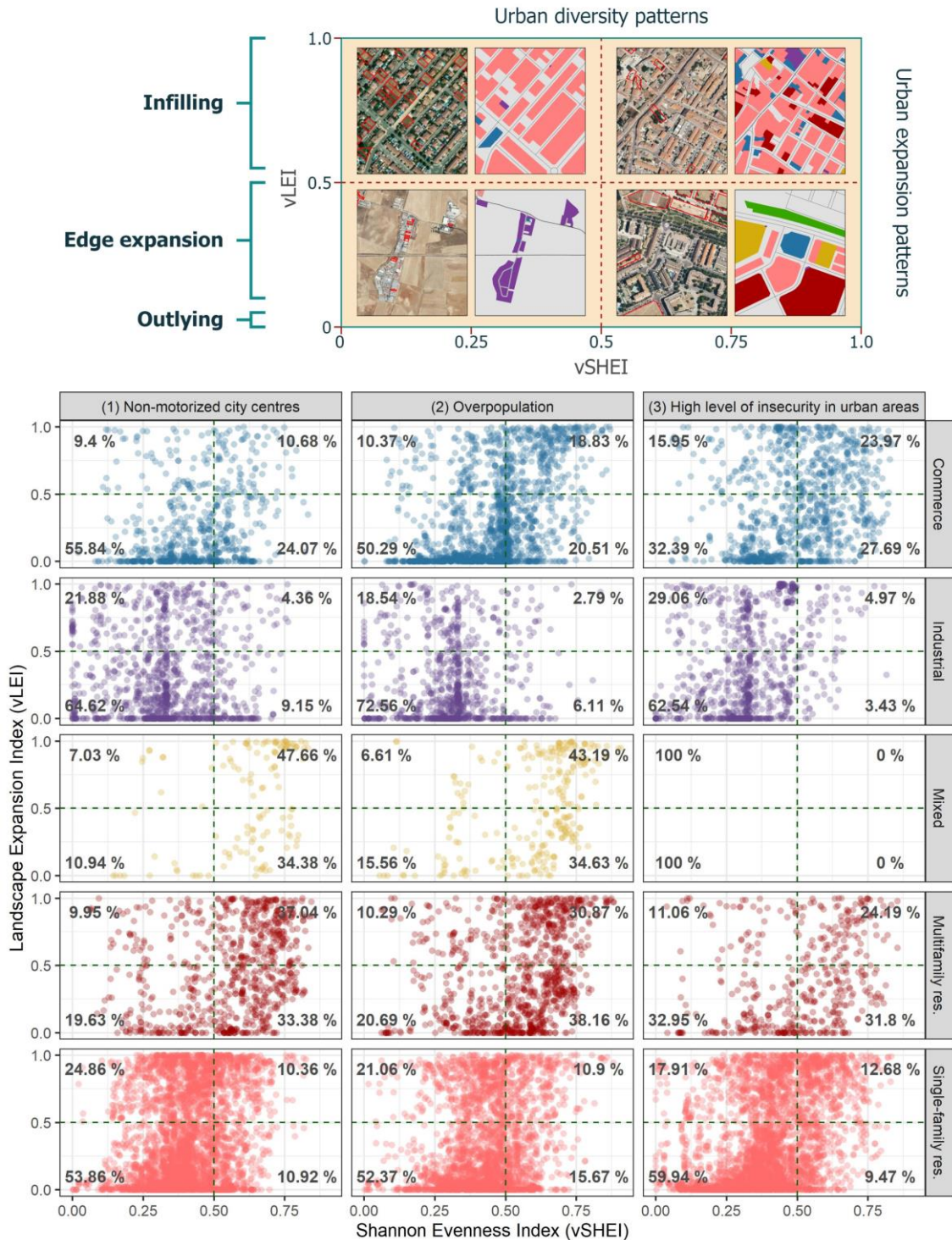


Figure 10. Correlation between vLEI and vSHEI for each urban land use and according to the different scenarios for new developed parcels (2018-2050). Percentages indicate the cumulative proportion of parcels in the given sector.

Moreover, in the Non-motorized city centres and Overpopulation scenarios, multi-family residential and mixed (housing and retail) are the only uses where more than a third of future growth has high diversity patterns and high infilling growth patterns (high-high). These quantitative indicators reflect the high mix of residential, retail, leisure facilities and workplaces in both scenarios.

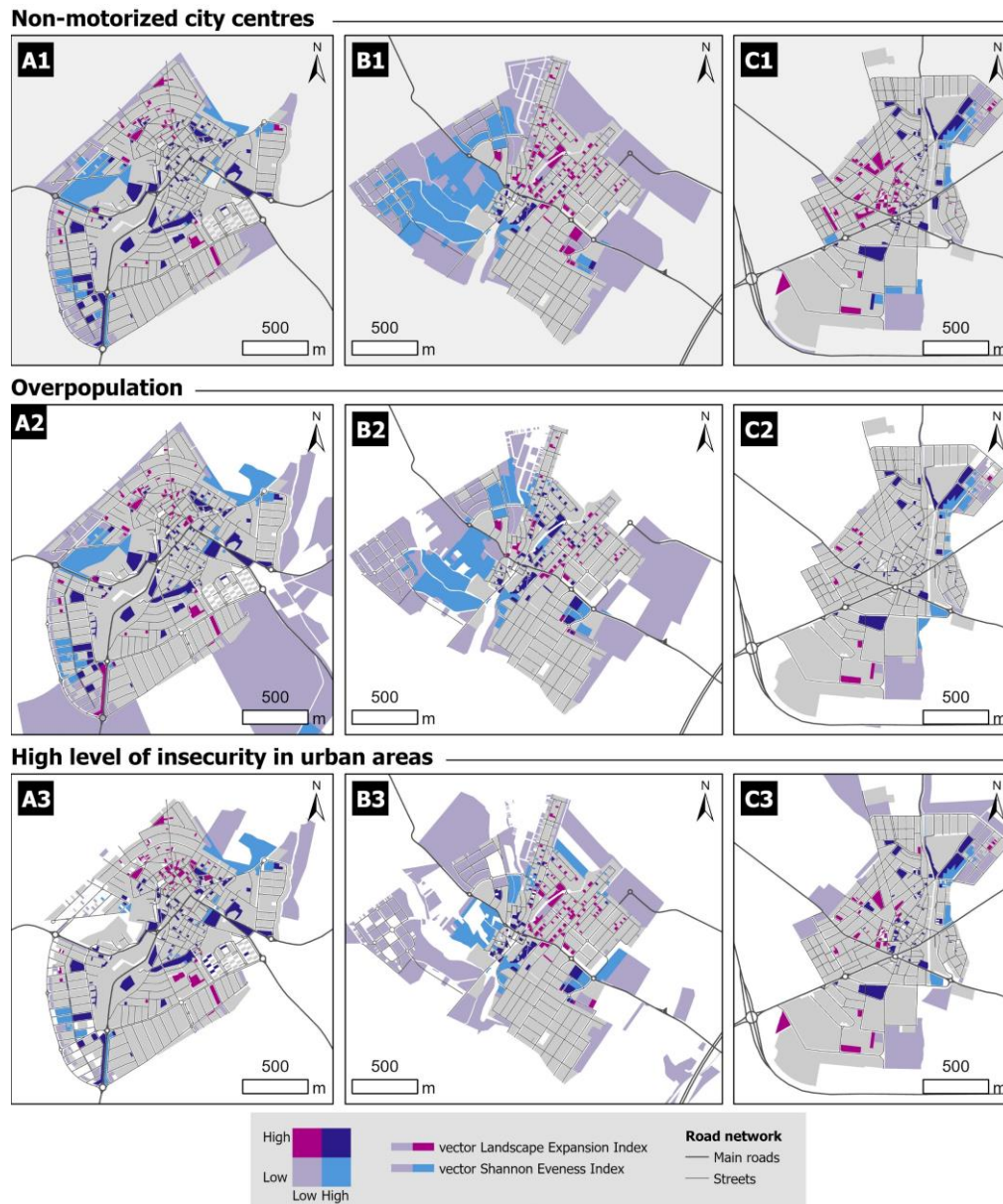


Figure 11. Bivariate maps illustrating the combined level of vSHEI and vLEI for three urban areas in the Henares Corridor.

The greatest difference between scenarios can be seen in commerce and utilities, especially in the High level of insecurity in urban areas scenario, where 32% of the newly developed parcels showed a low concentration of urban expansion and low diversity (low-low). In the other scenarios this figure is over 50%. Moreover, whereas only 10.68% of the parcels are high-high in the Non-motorized city centres scenario, in the High level of insecurity in urban areas scenario this value is 23.97%. In the latter scenario, commercial use has increased in some central

neighbourhoods, as residential housing moved to the periphery in the face of higher crime rates in the centre, where some low-income housing remains.

These differences are also clearly visible in the maps in Fig. 11, showing three highlighted urban areas from the study area. As Rueda Palenzuela et al., (2022) make clear, in Spain, the lowest urban diversity values are normally found in the peripheral areas of the city, while the highest diversity is in the city centre. In other words, isolated and edge-type growth is normally a source of low diversity, while infilling creates higher diversity. However, this general idea does not apply to all cities, and it is therefore important to look at each case in detail on a local scale and within its own particular context. Moreover, given that complex urban systems are particularly sensitive to change, a high-resolution dataset would be advisable (Walloth et al., 2016). It is therefore important to disaggregate data to a high level of detail such as the parcel, which is compatible with the unit of scale used in planning and allows us to obtain more accurate, more spatially explicit results.

These results demonstrate that the methods implemented here can obtain detailed information on urban diversity and urban expansion patterns from simulated land use maps. Both the vSHEI and vLEI indexes have provided accurate values to understand the direction in which the scenarios may evolve in terms of urban diversity and growth patterns. Combining vSHEI and vLEI has yielded an in-depth understanding of the relationship between them, as demonstrated in other previous studies (Ritsema van Eck & Koomen, 2008).

As the results have shown, the ability of the implemented methods to obtain detailed information on urban diversity and urban expansion patterns from simulated land use maps has been demonstrated. Both vSHEI and vLEI indexes have provided accurate values to understand the direction in which the scenarios may evolve in term of urban diversity and growth patterns, and their combination has yielded an in-depth understanding of the relationship between them, as demonstrated in other studies (Ritsema van Eck & Koomen, 2008).

4. CONCLUDING REMARKS

The comparison of scenarios provides a better understanding of how planning decisions can affect urban growth patterns and of their possible impacts on the natural environment (Herold et al., 2005). In addition, analysing the composition and spatial configuration of our cities allows for better interpretation of urban processes (Ritsema van Eck & Koomen, 2008). The combination of spatial metrics presented here offers a first step towards the characterisation and comparison of future disruptive scenarios simulated with vector data, in this case in the Henares Corridor (Spain).

In the present analysis, two vector spatial metrics were developed and applied at the parcel level. Rather than obtaining a global value for the entire landscape, we used moving windows to obtain a value for each parcel, so enabling us to map the spatial distribution of the metric. In addition, this research applies a case study-specific multiscale analysis, choosing the optimal buffer size to compute vSHEI and vLEI. To this end, the geometry of the parcels is taken into account, adapting their analysis to the morphology of the city.

In this regard, the development and implementation of vSHEI and vLEI, calculated using moving window metrics, makes a valuable contribution to the characterisation and comparison of simulated urban scenarios, in that it enables us to quantify the main characteristics of these scenarios, and to test whether the simulated urban patterns match those described in the narratives, and to accurately identify any differences between them. This raises several other issues that must also be addressed. For example, identifying the land covers on which outlying parcels tend to

develop. This would help avoid fragmentation of the landscape, a phenomenon that affects the resilience of natural and semi-natural environments.

In addition, given the iterative operation of the LP-CA model used to simulate the scenarios, the algorithm for calculating vLEI could be improved by applying a multi-temporal methodology, adapting the Multi-order Landscape Expansion Index (MLEI) (Jiao et al., 2015) to the dynamic visualisation of particular types of growth over time in vector land-use maps. This may lead to oscillatory behaviour in spatiotemporal patterns during the urban expansion process (Chakraborty et al., 2021; He et al., 2017; Xu et al., 2007) where urban growth alternate dispersion and aggregation phases including change in scale, as describes Dietzel et al. (2005).

In future research, these metrics could be applied to observe how modifying the current parameters of the LP-CA model generates different growth patterns. This could assist in designing future pathways towards the desired scenario, thus enabling the customized generation of land use maps with higher or lower urban diversity and with different types of urban expansion.

REFERENCES

- Abdullahi, S., Pradhan, B., Mansor, S., & Shariff, A. R. M. (2015). GIS-based modeling for the spatial measurement and evaluation of mixed land use development for a compact city. *GIScience & Remote Sensing*, 52(1), 18–39. <https://doi.org/10.1080/15481603.2014.993854>
- Abolhasani, S., Taleai, M., Karimi, M., & Rezaee Node, A. (2016). Simulating urban growth under planning policies through parcel-based cellular automata (ParCA) model. *International Journal of Geographical Information Science*, 30(11), 2276–2301. <https://doi.org/10.1080/13658816.2016.1184271>
- Aguilera Benavente, F., Gómez Delgado, M., & Cantergiani, C. C. (2010). Instrumentos de simulación prospectiva del crecimiento urbano. *Ciudad y Territorio. Estudios Territorial*, XLII(1), 481–496.
- Aguilera, F., Valenzuela, L. M., & Botequilha-Leitão, A. (2011). Landscape metrics in the analysis of urban land use patterns: A case study in a Spanish metropolitan area. *Landscape and Urban Planning*, 99(3–4), 226–238. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.10.004>
- Ariza-Álvarez, A., Soria-Lara, J. A., & Aguilera-Benavente, F. (2023). Re-thinking the role of exploratory scenarios for adaptive policymaking: an application for land use and transport planning. *Futures*. <https://doi.org/10.1016/J.FUTURES.2023.103139>
- Arora, A., Pandey, M., Mishra, V. N., Kumar, R., Rai, P. K., Costache, R., Punia, M., & Di, L. (2021). Comparative evaluation of geospatial scenario-based land change simulation models using landscape metrics. *Ecological Indicators*, 128, 107810. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107810>
- Barredo, J. I., Demicheli, L., Lavalle, C., Kasanko, M., & McCormick, N. (2004). Modelling future urban scenarios in developing countries: An application case study in Lagos, Nigeria. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(1), 65–84. <https://doi.org/10.1068/b29103>
- Barreira-González, P., Aguilera-Benavente, F., & Gómez-Delgado, M. (2019). Implementation and calibration of a new irregular cellular automata-based model for local urban growth simulation: The MUGICA model. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 46(2), 243–263. <https://doi.org/10.1177/2399808317709280>


- Baumgärtner, S. (2006). Measuring the Diversity of What? And for What Purpose? A Conceptual Comparison of Ecological and Economic Biodiversity Indices. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.894782>
- Bettencourt, L., & West, G. (2010). A unified theory of urban living. *Nature*, 467(7318), 912–913. <https://doi.org/10.1038/467912a>
- Bordoloi, R., Mote, A., Sarkar, P. P., & Mallikarjuna, C. (2013). Quantification of Land Use Diversity in The Context of Mixed Land Use. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104, 563–572. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.150>
- Burriel, E. L. (2011). Subversion of land-use plans and the housing bubble in Spain. *Urban Research & Practice*, 4(3), 232–249. <https://doi.org/10.1080/17535069.2011.616743>
- Cabral, P., Augusto, G., Tewolde, M., & Araya, Y. (2013). Entropy in Urban Systems. *Entropy* 2013, Vol. 15, Pages 5223-5236, 15(12), 5223–5236. <https://doi.org/10.3390/E15125223>
- Camagni, R., Gibelli, M. C., & Rigamonti, P. (2002). Urban mobility and urban form: the social and environmental costs of different patterns of urban expansion. *Ecological Economics*, 40(2), 199–216. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(01\)00254-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(01)00254-3)
- Carpio-Pinedo, J., Benito, M., Lamíquiz Daudén, P. J., & Pozueta Echavarri, J. (2018). Medir la mezcla de usos como complementariedad funcional y espacial. Los tejidos de la burbuja inmobiliaria en el Área Metropolitana de Madrid (1990-2012). *Ciudad y Formas Urbanas*. Vol. 5. Formas Urbanas, Planeamiento, Proyecto Urbano, 73–84.
- Chakraborty, A., & McMillan, A. (2015). Scenario Planning for Urban Planners: Toward a Practitioner's Guide. *Journal of the American Planning Association*, 81(1), 18–29. <https://doi.org/10.1080/01944363.2015.1038576>
- Chakraborty, S., Maity, I., Patel, P. P., Dadashpoor, H., Pramanik, S., Follmann, A., Novotný, J., & Roy, U. (2021). Spatio-temporal patterns of urbanization in the Kolkata Urban Agglomeration: A dynamic spatial territory-based approach. *Sustainable Cities and Society*, 67, 102715. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2021.102715>
- Deng, J. S., Wang, K., Hong, Y., & Qi, J. G. (2009). Spatio-temporal dynamics and evolution of land use change and landscape pattern in response to rapid urbanization. *Landscape and Urban Planning*, 92(3–4), 187–198. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.05.001>
- Díaz-Pacheco, J., & García-Palomares, J. C. (2014). Urban Sprawl in the Mediterranean Urban Regions in Europe and the Crisis Effect on the Urban Land Development: Madrid as Study Case. *Urban Studies Research*, 2014, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2014/807381>
- Díaz-Varela, E., Álvarez-López, C. J., & Marey-Pérez, M. F. (2009). Multiscale delineation of landscape planning units based on spatial variation of land-use patterns in Galicia, NW Spain. *Landscape and Ecological Engineering*, 5(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s11355-008-0053-4>
- Díaz-Varela, E., Rocas-Díaz, J. V., & Álvarez-Álvarez, P. (2016). Detection of landscape heterogeneity at multiple scales: Use of the Quadratic Entropy Index. *Landscape and Urban Planning*, 153, 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.05.004>
- Dietzel, C., Oguz, H., Hemphill, J. J., Clarke, K. C., & Gazulis, N. (2005). Diffusion and Coalescence of the Houston Metropolitan Area: Evidence Supporting a New Urban Theory. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 32(2), 231–246. <https://doi.org/10.1068/b31148>
- Eom, S., Suzuki, T., & Lee, M.-H. (2020). A land-use mix allocation model considering adjacency, intensity, and proximity. *International Journal of Geographical Information Science*, 34(5), 899–923. <https://doi.org/10.1080/13658816.2019.1687899>

- Frazier, A. E., & Kedron, P. (2017). Landscape Metrics: Past Progress and Future Directions. *Current Landscape Ecology Reports* 2017 2:3, 2(3), 63–72. <https://doi.org/10.1007/S40823-017-0026-0>
- Fujita, M., & Ois Thisse, J. (1996). Economics of Agglomeration. *Journal of the Japanese and International Economies*, 10(4), 339–378.
- Goodspeed, R. (2020). *Scenario Planning for Cities and Regions: Managing and Envisioning Uncertain Futures*. Lincoln Institute of Land Policy. <https://books.google.es/books?id=SffpywEACAAJ>
- Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X., & Briggs, J. M. (2008). Global Change and the Ecology of Cities. *Science*, 319(5864), 756–760. <https://doi.org/10.1126/science.1150195>
- He, Q., Song, Y., Liu, Y., & Yin, C. (2017). Diffusion or coalescence? Urban growth pattern and change in 363 Chinese cities from 1995 to 2015. *Sustainable Cities and Society*, 35, 729–739. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2017.08.033>
- Hennig, E., Jaeger, J., Soukup, T., Orlitová, E., Schwick, C., & Kienast, F. (2016). Urban sprawl in Europe. <https://www.eea.europa.eu/publications/urban-sprawl-in-europe>
- Herold, M., Couclelis, H., & Clarke, K. C. (2005). The role of spatial metrics in the analysis and modeling of urban land use change. *Computers, Environment and Urban Systems*, 29(4), 369–399. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2003.12.001>
- Hopkins, L. D., & Zapata, M. A. (2007). Engaging the future. Forecasts, Scenarios, Plans and Projects. In *Intergovernmental Panel on Climate Change (Ed.), Tools for Effective Planning Practices* (pp. 1–30). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Hou, H., Wang, R., & Murayama, Y. (2019). Scenario-based modelling for urban sustainability focusing on changes in cropland under rapid urbanization: A case study of Hangzhou from 1990 to 2035. *Science of The Total Environment*, 661, 422–431. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.208>
- Iannillo, A., & Fasolino, I. (2021). Land-Use Mix and Urban Sustainability: Benefits and Indicators Analysis. *Sustainability*, 13(23), 13460. <https://doi.org/10.3390/su132313460>
- Jiao, L., Mao, L., & Liu, Y. (2015). Multi-order Landscape Expansion Index: Characterizing urban expansion dynamics. *Landscape and Urban Planning*, 137, 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.023>
- Liu, X., Li, X., Chen, Y., Tan, Z., Li, S., & Ai, B. (2010). A new landscape index for quantifying urban expansion using multi-temporal remotely sensed data. *Landscape Ecology*, 25(5), 671–682. <https://doi.org/10.1007/s10980-010-9454-5>
- Luck, M., & Wu, J. (2002). A gradient analysis of urban landscape pattern: A case study from the Phoenix metropolitan region, Arizona, USA. *Landscape Ecology*, 17(4), 327–339. <https://doi.org/10.1023/A:1020512723753/METRICS>
- Maclean, M. G., & Congalton, R. G. (2013). PolyFrag: a vector-based program for computing landscape metrics. [Http://Dx.Doi.Org/10.1080/15481603.2013.856537](http://Dx.Doi.Org/10.1080/15481603.2013.856537), 50(6), 591–603. <https://doi.org/10.1080/15481603.2013.856537>
- Mallampalli, V. R., Mavrommati, G., Thompson, J., Duveneck, M., Meyer, S., Ligmann-Zielinska, A., Druschke, C. G., Hychka, K., Kenney, M. A., Kok, K., & Borsuk, M. E. (2016). Methods for translating narrative scenarios into quantitative assessments of land use change. *Environmental Modelling and Software*, 82, 7–20. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.04.011>

- McGarigal, K. (2012). Landscape Pattern Metrics. In A. H. El-Shaarawi & W. W. Piegorsch (Eds.), *Encyclopedia of Environmetrics*. Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9780470057339.val006.pub2>
- McGarigal, K., & Cushman, S. A. (2005). The gradient concept of landscape structure. In: Wiens, John A.; Moss, Michael R., Eds. *Issues and Perspectives in Landscape Ecology*. Cambridge University Press. p. 112-119., 112–119.
<https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/52867>
- McGarigal, K., Cushman, S. A., & Ene, E. (2012). FRAGSTATS v4: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps.
<https://doi.org/http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>
- Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, D. de V. y S. (2021). Áreas urbanas en España (p. 41).
- Molinero-Parejo, R., Aguilera-Benavente, F., Gómez-Delgado, M., & Shurupov, N. (2023). Combining a land parcel cellular automata (LP-CA) model with participatory approaches in the simulation of disruptive future scenarios of urban land use change. *Computers, Environment and Urban Systems*, 99, 101895.
<https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2022.101895>
- Molinero-Parejo, R., Aguilera-Benavente, F., Gómez-Delgado, M., & Soria-Lara, J. A. (2021). Mapping disruptive long-term scenarios using a participatory approach. *Journal of Maps*, 1–10. <https://doi.org/10.1080/17445647.2021.1937726>
- Moreno, N., Ménard, A., & Marceau, D. J. (2008). VecGCA: A Vector-Based Geographic Cellular Automata Model Allowing Geometric Transformations of Objects. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 35(4), 647–665. <https://doi.org/10.1068/b33093>
- Plata Rocha, W., Gómez-Delgado, M., & Bosque-Sendra, J. (2011). Simulating urban growth scenarios using GIS and multicriteria analysis techniques: A case study of the Madrid region, Spain. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 38(6), 1012–1031.
<https://doi.org/10.1068/b37061>
- Ritsema van Eck, J., & Koomen, E. (2008). Characterising urban concentration and land-use diversity in simulations of future land use. *The Annals of Regional Science*, 42(1), 123–140. <https://doi.org/10.1007/s00168-007-0141-7>
- Rueda Palenzuela, S., Santasusagna Riu, A., Cormenzana Izquierdo, B., Tort Donada, J., & Úbeda, X. (2022). Understanding Urban Complexity via the Spatial Diversity of Activities: An Application to Barcelona (Spain). *Sustainability*, 14(3), 1298.
<https://doi.org/10.3390/su14031298>
- Rueda-Palenzuela, S. (2022). La complejidad urbana y su relación con la morfología de los tejidos urbanos y la proximidad. *Ciudad y Territorio Estudios Territoriales*, 54(M), 227–250. <https://doi.org/10.37230/CyTET.2022.M22.10>
- Shannon, C. E., & Weaver, W. (1949). *The mathematical theory of communication* (C. E. Shannon & W. Weaver, Eds.). University of Illinois Press.
- Song, Y., Merlin, L., & Rodriguez, D. (2013). Comparing measures of urban land use mix. *Computers, Environment and Urban Systems*, 42, 1–13.
<https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2013.08.001>
- Soria-Lara, J. A., Ariza-Álvarez, A., Aguilera-Benavente, F., Cascajo, R., Arce-Ruiz, R. M., López, C., & Gómez-Delgado, M. (2021). Participatory visioning for building disruptive future scenarios for transport and land use planning. *Journal of Transport Geography*, 90(December 2019), 102907. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102907>

- Vizzari, M., & Sigura, M. (2013). Urban-rural gradient detection using multivariate spatial analysis and landscape metrics. *Journal of Agricultural Engineering*, 44(s2). <https://doi.org/10.4081/JAE.2013.333>
- Wade, T. G., Wickham, J. D., Nash, M. S., Neale, A. C., Riitters, K. H., & Jones, K. B. (2003). A Comparison of Vector and Raster GIS Methods for Calculating Landscape Metrics Used in Environmental Assessments. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(12), 1399–1405. <https://doi.org/10.14358/PERS.69.12.1399>
- Walloth, C., Gebetsroither-Geringer, E., Atun, F., & Werner, L. C. (2016). Understanding Complex Urban Systems (C. Walloth, E. Gebetsroither-Geringer, F. Atun, & L. C. Werner, Eds.). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-30178-5>
- Wang, R., Murayama, Y., & Morimoto, T. (2021). Scenario simulation studies of urban development using remote sensing and GIS: review. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 22, 100474. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100474>
- White, R., Straatman, B., & Engelen, G. (2004). Planning Scenario Visualization and Assessment: A Cellular Automata Based Integrated Spatial Decision Support System. In M. F. Goodchild & D. G. Janelle (Eds.), *Spatially integrated social science* (pp. 420–456). Oxford University Press.
- Wilson, E. H., Hurd, J. D., Civco, D. L., Prisloe, M. P., & Arnold, C. (2003). Development of a geospatial model to quantify, describe and map urban growth. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 275–285. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00074-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00074-9)
- Wu, D. Q., Tan, J., Guo, F., Li, H., Chen, S., & Jiang, S. (2020). Multi-Scale Identification of Urban Landscape Structure Based on Two-Dimensional Wavelet Analysis: The Case of Metropolitan Beijing, China. *Ecological Complexity*, 43, 100832. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2020.100832>
- Xiang, W. N., & Clarke, K. C. (2003). The use of scenarios in land-use planning. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 30(6), 885–909. <https://doi.org/10.1068/B2945>
- Xu, C., Liu, M., Zhang, C., An, S., Yu, W., & Chen, J. M. (2007). The spatiotemporal dynamics of rapid urban growth in the Nanjing metropolitan region of China. *Landscape Ecology*, 22(6), 925–937. <https://doi.org/10.1007/S10980-007-9079-5/FIGURES/10>
- Yang, H., Fu, M., Wang, L., & Tang, F. (2021). Mixed Land Use Evaluation and Its Impact on Housing Prices in Beijing Based on Multi-Source Big Data. *Land*, 10(10), 1103. <https://doi.org/10.3390/land10101103>
- Yao, Y., Cheng, T., Sun, Z., Li, L., Chen, D., Chen, Z., Wei, J., & Guan, Q. (2022). VecLI: A framework for calculating vector landscape indices considering landscape fragmentation. *Environmental Modelling & Software*, 149, 105325. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2022.105325>
- Yao, Y., Li, L., Liang, Z., Cheng, T., Sun, Z., Luo, P., Guan, Q., Zhai, Y., Kou, S., Cai, Y., Li, L., Ye, X., & Kong, H. (2021). UrbanVCA: a vector-based cellular automata framework to simulate the urban land-use change at the land-parcel level. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2103.08538>
- Yao, Y., Liu, X., Li, X., Liu, P., Hong, Y., Zhang, Y., & Mai, K. (2017). Simulating urban land-use changes at a large scale by integrating dynamic land parcel subdivision and vector-based cellular automata. *International Journal of Geographical Information Science*, 31(12), 2452–2479. <https://doi.org/10.1080/13658816.2017.1360494>

- Yu, M., Huang, Y., Cheng, X., & Tian, J. (2019). An ArcMap plug-in for calculating landscape metrics of vector data. *Ecological Informatics*, 50, 207–219.
<https://doi.org/10.1016/J.ECOINF.2019.02.004>
- Zachary, D., & Dobson, S. (2020). Urban Development and Complexity: Shannon Entropy as a Measure of Diversity. *Planning Practice & Research*, 1–17.
<https://doi.org/10.1080/02697459.2020.1852664>



«[...] los suburbios son, a menudo, diez, cien veces más extensos que la ciudad. De estos lugares enfermos, donde la función distancia-tiempo plantea una difícil cuestión aún sin respuesta, algunos quieren hacer ciudades-jardín. Paraísos ilusorios, solución irracional».

Le Corbusier

Capítulo 05

CONCLUSIONES, LIMITACIONES Y LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN



CAPÍTULO 05



CONCLUSIONES, LIMITACIONES Y LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

5.1. CONCLUSIONES GENERALES

La presente investigación ha abordado de manera específica el diseño, cartografiado, simulación y evaluación de escenarios futuros de crecimiento urbano y cambios de usos del suelo mediante el desarrollo y aplicación de un modelo espacial basado en AC vectoriales. La aplicación de esta metodología basada en las TIG ofrece valor añadido a los instrumentos de planificación urbana, haciendo que esta se lleve a cabo de manera más informada en un contexto de elevada incertidumbre. Como se ha puesto de relieve, el interés por establecer una planificación más proactiva, participativa y adaptativa de las áreas urbanas es una cuestión de urgente necesidad, a la que da soporte la presente investigación.

Inicialmente se estudiaron los modelos de simulación prospectiva en combinación con prácticas participativas, hecho que se ha complementado con la incorporación de escenarios disruptivos capaces de representar imágenes futuras difícilmente imaginables, pero plausibles. Así, para lograr que la integración de estos métodos aprovechara las sinergias y ofreciese resultados prácticos y acorde a los escenarios diseñados, se llevaron a cabo tareas de desarrollo y actualización de un modelo de simulación espacial basado en AC vectoriales.

Dichos avances se han presentado a través de los trabajos publicados a lo largo de la presente tesis doctoral. A continuación, se detallan las principales conclusiones obtenidas para cada uno de los objetivos alcanzados:

Objetivo 1. *Obtener una primera representación espacial de visiones futuras imaginativas y disruptivas relacionadas con los cambios en los usos del suelo urbano y los patrones de movilidad a través del empleo de metodologías de cartografiado participativo.*

En las primeras etapas del proceso de modelización urbana, representar espacialmente escenarios futuros a largo plazo generados mediante procesos participativos ha permitido obtener una primera aproximación de las características geográficas de cada uno. Esta tarea adquiere especial interés cuando se pretenden diseñar escenarios fuera de un marco histórico tendencial, es decir, donde los datos cuantitativos de la evolución pasada no aportan suficiente información para construir escenarios disruptivos.

En este contexto, el desarrollo de un taller interactivo con agentes relacionados con la planificación urbana y el transporte condujo a una representación espacial detallada de tres visiones disruptivas. Por su parte, las técnicas interactivas utilizadas (cartografía con marcadores de colores que representan los usos del suelo, combinado con el dibujo de infraestructuras de transporte) y la organización del taller en grupos de discusión multidisciplinares permitieron el

diálogo simultáneo entre expertos, la comunicación cara a cara y la interacción dinámica con la propia cartografía.

En contraposición, emplear únicamente técnicas tradicionales como el dibujo manual (Dennis, 2006) impide una interacción dinámica con los elementos y dificulta integrar procesos urbanos como la conversión de usos del suelo o el abandono de ciertas parcelas ya urbanizadas. Por otra parte, la representación mediante aplicaciones de cartografiado en web (*web mapping*) (Rzeszewski & Kotus, 2019), limita la interacción cara a cara entre los participantes si no tiene lugar en un mismo espacio. En este sentido, los mapas generados presentaron un lenguaje intuitivo y amigable para la planificación de las áreas urbanas, aportaron una primera representación general de posibles dinámicas urbanas y características espaciales que pueden definir a los escenarios disruptivos y, además, favorecieron el intercambio de ideas para el desarrollo de políticas de gestión urbana de cada escenario.

Por último, cabe señalar la importancia de los resultados en el apoyo a modelos de simulación urbana (Guan et al., 2011; Hewitt et al., 2014). Frente al uso exclusivo de narrativas (historias contadas en palabras de un posible futuro que ofrecen una descripción menos detallada), los escenarios cartografiados a través de visiones futuras fueron posteriormente empleados para mejorar los procesos de calibración del modelo de simulación desarrollado.

Objetivo 2. *Identificar los factores que explican el crecimiento de cada uno de los usos del suelo urbano para los diferentes escenarios disruptivos cartografiados mediante el desarrollo de un modelo de RLGP aplicable a conjuntos de datos vectoriales.*

La difícil tarea de determinar los factores motrices que intervienen en la evolución de las dinámicas urbanas de crecimiento y cambios en los usos del suelo urbano ha sido sorteada gracias al empleo de técnicas de estadística espacial. Concretamente, el modelo de RLGP logró explicar más de la mitad de la variabilidad de la distribución espacial para todos los usos del suelo urbano que experimentaron crecimiento en los tres escenarios analizados. A pesar de la complejidad de determinar dichos factores a una escala de elevado detalle (nivel de parcela) y de la especificidad de los usos simulados (comercial, industrial, residencial unifamiliar, residencial multifamiliar y residencial mixto), la adaptación de este método estadístico a la información extraída de la cartografía del taller previo y el análisis minucioso de los resultados lograron alcanzar dicho objetivo.

Adicionalmente, cabría destacar el aporte en cuanto a la determinación de factores de un escenario futuro, frente a la tradicional aplicación para explorar los factores involucrados en periodos pasados. En un contexto de simulación urbana, esta metodología ha permitido calibrar (desde una perspectiva futura) el parámetro de aptitud para un modelo basado en AC. En conclusión, integrar esta metodología en la definición de las reglas de transición de los modelos urbanos basados en AC no solo mejora el rendimiento de las simulaciones (Mirbagheri & Alimohammadi, 2017), sino que también logra reorientar el enfoque para entender que factores pueden influir, en mayor o menor medida, bajo diferentes supuestos o acontecimientos disruptivos que puedan ocurrir en un contexto de evolución urbana.

Objetivo 3. *Desarrollar un modelo de simulación basado en AC que emplee parcelas catastrales como unidad espacial, capaz de integrar múltiples usos del suelo urbano y que permita reproducir patrones y procesos urbanos disruptivos y realistas como el abandono de zonas urbanas o la sustitución del uso de ciertas parcelas urbanas por otros usos.*

Para que un modelo basado en AC sea capaz de simular escenarios disruptivos, a la vez que realistas, es necesario que este reproduzca patrones y procesos urbanos atípicos, pero de gran

impacto territorial. Para alcanzar esta idea implícita en el objetivo 3, se logró desarrollar con éxito un modelo de simulación basado en AC vectoriales que emplea como unidad espacial la parcela catastral. La capacidad de simular cinco usos del suelo de manera simultánea aporta un mayor nivel de detalle frente a otros trabajos de gran repercusión en el ámbito español (Barreira-González et al., 2019). Adicionalmente, el modelo logra integrar nuevas dinámicas como la conversión interna entre los cinco usos del suelo urbano (por ej.: de comercial a residencial multifamiliar). Al mismo tiempo, el modelo logra reproducir patrones de abandono a través del proceso inverso de asignación, es decir, transforma el estado de una parcela con un uso del suelo urbano predefinido a no urbano (suelo vacante). Ambas mejoras ofrecen nuevos enfoques para este tipo de modelos aplicados a un entorno vectorial, que antes eran exclusivos de modelos regionales de cambios de usos del suelo aplicados a un formato regular (ráster).

Por otra parte, simular escenarios futuros basándose únicamente en la tendencia puede limitar la aparición de este tipo de dinámicas urbanas descritas, ya que los procesos de conversión interna entre usos del suelo urbano o la transformación de suelo urbanizable a no urbano han presentado una menor frecuencia en la evolución histórica de las ciudades (Zhai et al., 2020). Sin embargo, en los últimos años se están experimentando cambios significativos en este ámbito. Para dar solución a este problema, la nueva metodología se desarrolló específicamente para simular futuros estructuralmente distintos a través de la integración de los resultados obtenidos de prácticas participativas en la configuración de las reglas de transición.

Por último, y como etapa final del desarrollo, el modelo LP-CA fue validado parcialmente, demostrando que todos los factores tienen una incidencia equilibrada en los resultados, y concluyendo en que todos ellos son necesarios para lograr simulaciones precisas y realistas de crecimiento urbano y cambios en los usos del suelo.

En definitiva, el modelo LP-CA complementa el enfoque multi-escenario como herramienta de apoyo a la gestión urbana supramunicipal y a los procesos de toma de decisiones, permitiendo una mejor comprensión de la incertidumbre en los entornos urbanos. Al mismo tiempo, trata de preparar a los planificadores para actuar en una amplia gama de situaciones de manera anticipada y más informada. Ello resulta especialmente pertinente en periodos de elevada incertidumbre.

Objetivo 4. *Obtener simulaciones realistas de escenarios disruptivos mediante la integración de datos cualitativos derivados del taller de cartografiado participativo y datos cuantitativos obtenidos del modelo RLGP como parámetros de entrada del modelo.*

Este cuarto objetivo trata de conocer si el modelo LP-CA posee la capacidad necesaria para simular satisfactoriamente los diferentes escenarios. A lo largo del desarrollo de la investigación, se ha podido comprobar que las visiones futuras fueron simuladas y representadas a través de escenarios espacialmente explícitos con éxito. En este punto, cabría señalar que la utilidad de estos escenarios no reside en la asignación exacta de aquellas parcelas que desarrollan un nuevo uso concreto. No se trata de un modelo de predicción exacta, sino de una aproximación para conocer aquellas localizaciones con mayor probabilidad de sufrir un cambio y, en ese caso, cual puede ser el uso óptimo. Esto ayuda a conocer las posibles implicaciones territoriales que pueden tener los desarrollos urbanos bajo distintas situaciones futuras.

Para que dichos resultados fueran posibles, la información obtenida del taller de cartografiado participativo se empleó para calibrar diversos aspectos del modelo. Por una parte, el ajuste de la cantidad de crecimiento para cada uso del suelo urbano en base a los criterios de los agentes participantes aportó un nivel de adaptación a cada escenario superior al que se pudiera establecer mediante cantidades predefinidas basadas en un periodo histórico. El parámetro de accesibilidad logró aportar diferencias entre escenarios gracias a la integración en dicho parámetro de las

nuevas infraestructuras de transporte diseñadas. Y, por último, los mapas de aptitud generados mediante RLGP marcaron las principales diferencias en cuanto a la asignación de nuevos usos del suelo urbano. Además, este último avance fue un aspecto clave en la implementación de las nuevas dinámicas urbanas menos comunes de conversión (cambios internos entre usos del suelo urbano) y abandono (pérdida de suelo urbano).

Objetivo 5. *Evaluar espacialmente los escenarios futuros disruptivos simulados a través del empleo de métricas espacialmente explícitas calculadas a nivel de parcela catastral que permitan analizar patrones de diversidad y expansión urbana resultantes, así como evaluar la adecuación de las simulaciones a las narrativas.*

La evaluación de escenarios es una tarea esencial que conforma la etapa final del proceso de planificación de escenarios. En este sentido, conocer las principales características de los escenarios futuros simulados permite compararlos para así comprender mejor cómo pueden afectar las decisiones de la planificación a las pautas de crecimiento urbano y sus posibles repercusiones en el entorno natural (Herold et al., 2005). Además, permite interpretar mejor los procesos urbanos de configuración y composición espacial (Ritsema van Eck & Koomen, 2008).

Debido a la carencia de métodos específicos enfocados a analizar los patrones urbanos de configuración y composición espacial aplicables a mapas de usos del suelo urbano vectoriales, se desarrollaron dos métricas espaciales para ser aplicadas a nivel de parcela. Ambas métricas (vLEI y vSHEI), además de ser adaptadas para su aplicación a datos vectoriales, se implementaron mediante el uso de ventanas móviles, cuestión que les ha permitido aplicarse a nivel de parcela (no solo de clase o paisaje, como venía ocurriendo con el caso de las métricas de diversidad). Además, esta característica les ha otorgado la posibilidad de realizar dichos análisis a diferentes escalas mediante la modificación del tamaño de la ventana móvil. Esta modificación permite ajustar la distancia a la cual pueden afectar las diferentes relaciones espaciales.

Dichos avances no solo suponen una valiosa contribución en el campo de las métricas espaciales, sino que suponen también una contribución respecto a los instrumentos de evaluación de escenarios urbanos simulados, en la medida en que permiten cuantificar las principales características de dichos escenarios, e identificar con precisión las posibles diferencias entre ellos. Gracias a ello, las decisiones tomadas en la planificación urbana anticipada se podrían ajustar con mayor precisión a las consecuencias derivadas de las diferentes situaciones futuras en lo que respecta a los patrones de los usos del suelo urbano.

5.2. LIMITACIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

La simulación prospectiva de escenarios imaginativos y disruptivos de crecimiento urbano y cambios en los usos del suelo ha ofrecido resultados satisfactorios. A pesar de ello, han tenido lugar diversas cuestiones que no se han podido resolver debido a las limitaciones que estas presentan.

En cuanto a la estructura de los datos espaciales, las parcelas catastrales siguen suponiendo una limitación en las tareas de simulación del crecimiento urbano. A pesar de sus ventajas respecto al realismo que ofrecen en cuanto a la representación de la estructura urbana, así como de la información detallada que aportan, la forma y dimensiones de las parcelas cambian con frecuencia, especialmente cuando una parcela rústica se transforma en urbana para su posterior desarrollo. En este sentido, el modelo actual no hace una subdivisión parcelaria, ya que los criterios que establecen su forma y dimensión pueden llegar a ser muy variados y dependen de la entidad que desarrolle dicho espacio. Además, realizar una previa división de todo el parcelario que compone el área de estudio implicaría un coste computacional muy elevado durante la

ejecución del modelo de simulación. En esta línea, se plantea un proceso de división integrado en el propio modelo capaz de subdividir aquellas parcelas con alta probabilidad de desarrollo. No obstante, este proceso implicaría tomar nuevas decisiones. Por una parte, establecer si se produce un desarrollo simultáneo y equitativo (mismo uso, mismo tamaño, misma forma) de todas las áreas generadas dentro de una misma parcela o, por otra parte, aplicar un nuevo algoritmo de decisión para definir formas, tamaños y usos variados dentro de una misma parcela.

Otro reto al que se enfrentan los modelos de simulación del crecimiento urbano son las técnicas de validación y, especialmente, aquellos que tratan de simular escenarios disruptivos. Es bien sabido que los procesos urbanos que tiene lugar en un periodo de tiempo concreto pueden llegar a ser muy diferentes con respecto a los que se produzcan en el futuro (Triantakou & Stathakis, 2015). Así, los actuales procesos de validación para este tipo de fenómenos se centran en sentar las bases de las principales dinámicas territoriales, manteniendo la simulación en unos rangos «lógicos» o, por otra parte, en asegurar que los parámetros del modelo actúan de manera complementaria y contribuyen a alcanzar un resultado plausible. No obstante, no existe un método certero que determine si un modelo es capaz de producir la situación exacta que se espera, ya que no se conoce dicha situación futura.

En esta misma línea, pero enfocando la presente metodología desde otra perspectiva, es posible utilizar los modelos de simulación, no para evaluar las diferentes posibilidades que puedan acontecer bajo distintos escenarios, sino para identificar sobre qué aspectos relacionados con los patrones urbanos se ha de actuar para alcanzar un fin deseado o evitar situaciones futuras desfavorables. En este sentido, las métricas espaciales desarrolladas en esta investigación podrían aplicarse para observar cómo la modificación de los parámetros actuales del modelo LP-CA pueden generar diferentes patrones urbanos. No obstante, sea cual sea el enfoque escogido, se aconseja hacer un uso adecuado e informado de los escenarios para lograr una interpretación apropiada de los mismos.

Respecto a los métodos participativos, integrarlos en las tareas de diseño de escenarios o modelización espacial podría llegar a ser una importante limitación en ciertas situaciones. Dicha participación depende de la disponibilidad y voluntad de los participantes. En cuanto a la población no especializada, sigue siendo existiendo una brecha en la interpretación de la cartografía urbana y el conocimiento espacial, lo que dificulta hacer partícipe en tareas previas de diseño o evaluación de escenarios simulados a este colectivo. En esta línea, es necesario profundizar en la exploración de aplicaciones de cartografía interactiva a diferentes escalas, así como en la incorporación de la tercera dimensión (3D) que permita generar representaciones más realistas y fáciles de interpretar de los resultados.

Pero, dado que el objetivo final de desarrollar una metodología integrada para la simulación prospectiva del crecimiento urbano es aportar conocimiento científico contrastado para mejorar los instrumentos de la planificación urbana y afrontar los retos actuales y venideros, debe llevarse a cabo un importante esfuerzo de divulgación. Esta tarea pretende hacer llegar toda la metodología desarrollada, no solo al ámbito científico y técnico, sino también a la población local y a los organismos públicos encargados de la toma de decisiones.

En este contexto de transferencia de conocimientos, resulta de especial interés avanzar en el desarrollo tecnológico de un prototipo web que integre la gran mayoría de las herramientas desarrolladas y que conforma el proceso de planificación de escenarios. Partiendo de esta idea, se están realizando avances significativos gracias al proyecto SIM4PLAN (<https://sim4plan.transyt-projects.com/>). Este consiste en un sistema multiusuario para la simulación espacial de escenarios disruptivos que integren usos del suelo y sistemas de transporte (ver figura 26).

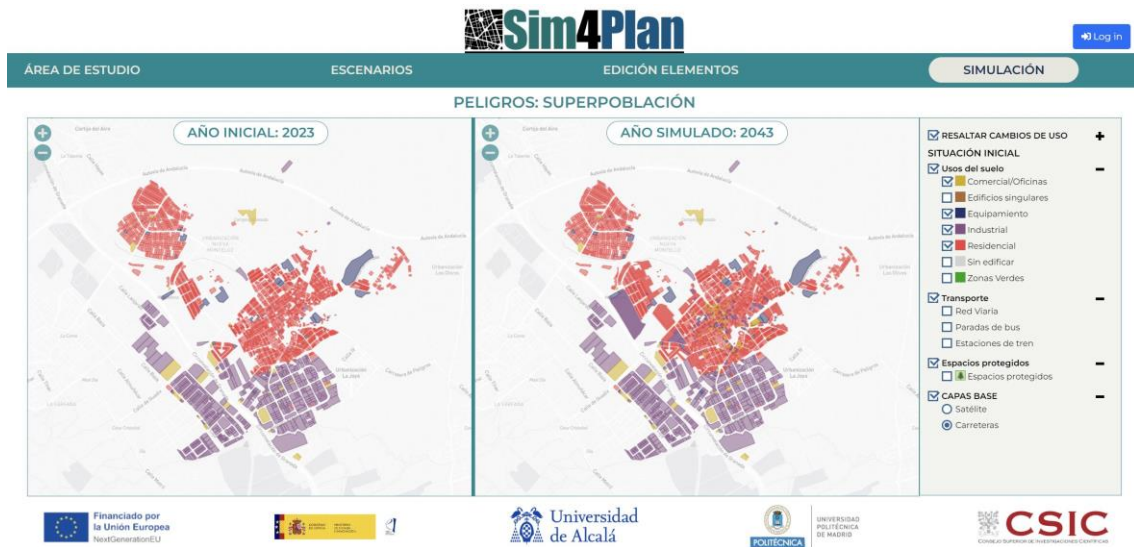


Figura 26. Resultados de la fase de simulación del prototipo SIM4PLAN.

El proyecto SIM4PLAN pretende fomentar y acelerar la transferencia de conocimientos y resultados generados en el proyecto en el que se enmarca la presente tesis doctoral. Para ello, pretende avanzar desde la formulación del concepto de tecnología (TRL 2) derivado de los resultados del proyecto I+D+i TRANS-URBAN, hasta la creación de un prototipo de código abierto validado en un entorno relevante con una selección de usuarios finales (TRL 5).



CONTRIBUCIONES Y PUBLICACIONES INCLUIDAS EN LA TESIS DOCTORAL

En esta sección se presenta un listado con todas las contribuciones y publicaciones originales desarrolladas durante el periodo 2019 – 2023 en el que ha tenido lugar la tesis doctoral. Un total de tres artículos científicos en revistas de impacto han sido publicados, y un cuarto se encuentra en revisión. cuatro comunicaciones a congresos, un registro de propiedad intelectual y un premio de divulgación en redes sociales. Se listan a continuación:

ARTÍCULOS

Molinero-Parejo, R., Aguilera-Benavente, F., Gómez-Delgado, M., & Soria-Lara, J. A. (2021). *Mapping disruptive long-term scenarios using a participatory approach*. Journal of Maps, 1–10. <https://doi.org/10.1080/17445647.2021.1937726>

Molinero-Parejo, R., Aguilera-Benavente, F., & Gómez-Delgado, M. (2021). *Regresión Logística Geográficamente Ponderada para identificar los factores explicativos de la distribución de usos de suelo en escenarios futuros de crecimiento urbano*. Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles, 88. <https://doi.org/10.21138/bage.3052>

Molinero-Parejo, R., Aguilera-Benavente, F., Gómez-Delgado, M., & Shurupov, N. (2023). *Combining a land parcel cellular automata (LP-CA) model with participatory approaches in the simulation of disruptive future scenarios of urban land use change*. Computers, Environment and Urban Systems, 99. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2022.101895>

Molinero-Parejo, R., Aguilera-Benavente, F., & Gómez-Delgado, M. (2021). *Characterisation and comparison of simulated urban scenarios applying vector moving windows metrics*. Transaction in GIS. En revisión.

COMUNICACIONES EN CONGRESOS

Molinero-Parejo, R., Ariza-Álvarez, A., Gómez-Delgado, M., Aguilera-Benavente, F., & Soria-Lara, J. A. (2020). *Diseño y caracterización espacial de escenarios futuros de desarrollo urbano y transporte mediante técnicas participativas en el Corredor del Henares (Madrid)*. XV Coloquio de Geografía Urbana, 605–619.

Molinero-Parejo, R., Gómez-Delgado, M., & Aguilera-Benavente, F. (2021). *Calibrating a new vector-based CA model: the role of time steps iteration*. 17th International Conference on Computational Urban Planning and Urban Management, CUPUM.

Molinero-Parejo, R., Aguilera-Benavente, F., Gómez-Delgado, M., Soria-Lara, J. A., & Shurupov, N. (2021). *Simulation of future disruptive urban scenarios using vector-based Cellular Automata models and participatory approaches*. 2021 EU Conference on Modelling for Policy Support: Collaborating across Disciplines to Tackle Key Policy Challenges.

Molinero-Parejo, R., Gómez-Delgado, M. & Aguilera-Benavente, F. (2023). *Aplicación de un análisis de sensibilidad para validar un modelo de simulación de crecimiento urbano a partir de autómatas celulares y basado en parcelas (LP-CA)*. Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica, CONFIBSIG.

REGISTROS DE PROPIEDAD INTELECTUAL Y PATENTES

Shurupov, N., **Molinero-Parejo, R.,** Aguilera-Benavente, F., & Gómez-Delgado, M. (2021). Disruptive Future Spatial Simulation (DFSS) model (Patent No. M-005031/2021). Expediente: 09-RTPI-05521.6/2021.

PREMIOS

Molinero-Parejo, R. (2021). *¿Cómo ayudan los modelos de simulación a la planificación sostenible de la ciudad y el territorio?* Ganador del II Concurso "Tu Tesis Doctoral en un Hilo de Twitter: #HiloTesis" en la Categoría General. Universidad de Alcalá y Conferencia de Rectores de las Universidades Españolas.



OTRAS CONTRIBUCIONES Y PUBLICACIONES RELACIONADAS

En esta sección se recogen las investigaciones publicadas en paralelo a la presente tesis doctoral, pero que no han contribuido de manera directa a alcanzar los objetivos y, por tanto, no se han integrado en el desarrollo de la investigación. Sin embargo, los avances logrados han ayudado a profundizar en los instrumentos implementados, como es el caso de RLGP. Además, los trabajos publicados relacionados con el tratamiento de la información catastral han facilitado en gran medida la manipulación de la base de datos principal de la que parte la tesis doctoral.

Se ha publicado un artículo científico en una revista de impacto, dos capítulos de libro y tres comunicaciones a congresos. Se listan a continuación:

ARTÍCULOS

Shurupov, N., **Molinero-Parejo, R.**, Rodríguez-Espinosa, V. M., & Aguilera-Benavente, F. (2022). *Clasificador Catastral: complemento de QGIS para la clasificación de los usos del suelo urbano a nivel de parcela*. Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles, 97.

CAPÍTULOS DE LIBRO

Camacho Olmedo, M. T., García-Álvarez, D., Gallardo, M., Mas, J.-F., Paegelow, M., Castillo-Santiago, M. Á., & **Molinero-Parejo, R.** (2022). Validation of Land Use Cover Maps: A Guideline. *Land Use Cover Datasets and Validation Tools*, 35–46.

https://doi.org/10.1007/978-3-030-90998-7_3

Molinero-Parejo, R. (2022). Geographically Weighted Methods to Validate Land Use Cover Maps. *Land Use Cover Datasets and Validation Tools*, 255–265.

https://doi.org/10.1007/978-3-030-90998-7_13

COMUNICACIONES EN CONGRESOS

Martín, B., **Molinero-Parejo, R.**, Shurupov, N., Ariza-Álvarez, A., Ortega, E., Navarro-Ligero, M., López-Lambas, M. E., Aguilera-Benavente, F., & Soria-Lara, J. A. (2022). *Improving skills of processing and mapping cadastral Information by an innovative QGIS plugin with teaching*. 14th International Conference on Education and New Learning Technologies (EDULEARN), 9397–9404.

- Shurupov, N., **Molinero-Parejo, R.**, Rodríguez-Espinosa, V. M., & Aguilera-Benavente, F. (2022). *Clasificación de usos del suelo urbano a nivel de parcela mediante Clasificador Catastral, un complemento de QGIS*. XIII Jornadas Ibéricas de Infraestructura de Datos Espaciales, JIIDE. Workshop / Taller 7.
- Shurupov, N., **Molinero-Parejo, R.**, Rodríguez-Espinosa, V. M., & Aguilera-Benavente, F. (2022). Clasificador Catastral: complemento de QGIS para la clasificación de los usos del suelo urbano a nivel de parcela. XIX Congreso de Tecnologías de La Información Geográfica, 614–623.



REFERENCIAS

Las referencias listadas a continuación pertenecen a las citas indicadas a lo largo de toda la tesis doctoral, excluyendo aquellas correspondientes a cada una de las publicaciones científicas ubicadas en la sección de desarrollo de la investigación, las ya contienen un listado con sus respectivas referencias.

- Abolhasani, S., Taleai, M., Karimi, M., & Rezaee Node, A. (2016). Simulating urban growth under planning policies through parcel-based cellular automata (ParCA) model. *International Journal of Geographical Information Science*, 30(11), 2276–2301. <https://doi.org/10.1080/13658816.2016.1184271>
- Aburas, M. M., Ho, Y. M., Ramli, M. F., & Ash'aari, Z. H. (2016). The simulation and prediction of spatio-temporal urban growth trends using cellular automata models: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 380–389. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.07.007>
- Ache, P. (2000). Vision and creativity—challenge for city regions. *Futures*, 32(5), 435–449. [https://doi.org/10.1016/S0016-3287\(99\)00085-3](https://doi.org/10.1016/S0016-3287(99)00085-3)
- Adamatzky, A. (2010). *Game of Life Cellular Automata* (A. Adamatzky, Ed.; Springer). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-217-9>
- Aguilera Benavente, F., Gómez Delgado, M., & Cantergiani, C. C. (2010). Instrumentos de simulación prospectiva del crecimiento urbano. *Ciudad y Territorio. Estudios Territorial*, XLII(1), 481–496.
- Aguilera Benavente, F., Plata Rocha, W., & Bosque Sendra, J. (2009). Diseño y simulación de escenarios de demanda de suelo urbano en ámbitos metropolitanos. *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanidad*, 4, 57–80.
- Aguilera Benavente, F., Valenzuela Montes, L. M., Soria Lara, J. A., Gómez Delgado, M., & Plata Rocha, W. (2011). Escenarios y modelos de simulación como instrumento en la planificación territorial y metropolitana. *Serie Geográfica*, 17, 11–28.
- Aguilera, F., Valenzuela, L. M., & Botequilha-Leitão, A. (2011). Landscape metrics in the analysis of urban land use patterns: A case study in a Spanish metropolitan area. *Landscape and Urban Planning*, 99(3–4), 226–238. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.10.004>
- Aguilera-Benavente, F., Botequilha-Leitão, A., & Díaz-Varela, E. (2014). Detecting multi-scale urban growth patterns and processes in the Algarve region (Southern Portugal). *Applied Geography*, 53, 234–245. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOG.2014.06.019>

- Ahern, J. (2013). Urban landscape sustainability and resilience: The promise and challenges of integrating ecology with urban planning and design. *Landscape Ecology*, 28(6), 1203–1212. <https://doi.org/10.1007/S10980-012-9799-Z/TABLES/2>
- Akerman, J., & Höjer, M. (2006). How much transport can the climate stand?—Sweden on a sustainable path in 2050. *Energy Policy*, 34(14), 1944–1957. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.02.009>
- Alqurashi, A. F., Kumar, L., & Al-Ghamdi, K. A. (2016). Spatiotemporal Modeling of Urban Growth Predictions Based on Driving Force Factors in Five Saudi Arabian Cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 2016, Vol. 5, Page 139, 5(8), 139. <https://doi.org/10.3390/IJGI5080139>
- Alves Furtado, B., Sakowski, P., & Tóvolli, M. (2015). *Modeling Complex System for Public Policies* (B. Alves Furtado, P. Sakowski, & M. Tóvolli, Eds.). ipea. <http://www.ipea.gov.br>
- Amer, M., Daim, T. U., & Jetter, A. (2013). A review of scenario planning. *Futures*, 46, 23–40. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2012.10.003>
- Antipova, T. (2021). Coronavirus Pandemic as Black Swan Event. In *Lecture Notes in Networks and Systems* (Vol. 136, pp. 356–366). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49264-9_32
- Ariza-Álvarez, A., Soria-Lara, J. A., Arce-Ruiz, R. M., López-Lambas, M. E., & Jimenez-Espada, M. (2021). Experimenting with scenario-building narratives to integrate land use and transport. *Transport Policy*, 101, 57–70. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.11.012>
- Aronson, M. F. J., Lepczyk, C. A., Evans, K. L., Goddard, M. A., Lerman, S. B., MacIvor, J. S., Nilon, C. H., & Vargo, T. (2017). Biodiversity in the city: key challenges for urban green space management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15(4), 189–196. <https://doi.org/10.1002/FEE.1480>
- Arranz-López, A., Soria-Lara, J. A., López-Escolano, C., & Pueyo Campos, Á. (2017). Making ‘Retail Mobility Environments’ visible for collaborative transport planning. *Journal of Maps*, 13(1), 90–100. <https://doi.org/10.1080/17445647.2017.1383945>
- Arsanjani, J. J., & Kainz, W. (2011). Integration Of Spatial Agents And Markov Chain Model In Simulation Of Urban Sprawl. *4th AGILE International Conference on Geographic Information Science*.
- Arsanjani, J. J., Kainz, W., & Mousivand, A. J. (2011). Tracking dynamic land-use change using spatially explicit Markov Chain based on cellular automata: the case of Tehran. *International Journal of Image and Data Fusion*, 2(4), 329–345. <https://doi.org/10.1080/19479832.2011.605397>
- Athanassopoulos, S., Kaklamanis, C., Kalfoutzos, G., & Papaioannou, E. (2012). Cellular Automata: Simulations Using Matlab. *He Sixth International Conference on Digital Society*.
- Avin, U., & Goodspeed, R. (2020). Using Exploratory Scenarios in Planning Practice: A Spectrum of Approaches. *Journal of the American Planning Association*, 0(0), 1–14. <https://doi.org/10.1080/01944363.2020.1746688>

- Avin, U., Goodspeed, R., & Murnen, L. (2022). From Exploratory Scenarios to Plans: Bridging the Gap. *Planning Theory & Practice*, 1–10.
<https://doi.org/10.1080/14649357.2022.2119008>
- Bai, X., Balk, D., Braga, T., Douglas, I., Elmqvist, T., Rees, W., Satterthwaite, D., Songsore, J., & Zlotnik, H. (2005). Urban Systems. In G. Mcgranahan & P. Marcotullio (Eds.), *Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends* (pp. 1–948). Island Press.
- Barredo, J. I., Demicheli, L., Lavallo, C., Kasanko, M., & McCormick, N. (2004). Modelling future urban scenarios in developing countries: An application case study in Lagos, Nigeria. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(1), 65–84.
<https://doi.org/10.1068/b29103>
- Barredo, J. I., Kasanko, M., McCormick, N., & Lavallo, C. (2003). Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata. *Landscape and Urban Planning*, 64(3), 145–160. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(02\)00218-9](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00218-9)
- Barreira González, P. (2017). *Local urban growth simulation: An irregular Cellular Automata based model approach*. Universidad de Alcalá.
- Barreira-González, P., Aguilera-Benavente, F., & Gómez-Delgado, M. (2015). Partial validation of cellular automata based model simulations of urban growth: An approach to assessing factor influence using spatial methods. *Environmental Modelling and Software*, 69, 77–89.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.03.008>
- Barreira-González, P., Aguilera-Benavente, F., & Gómez-Delgado, M. (2019). Implementation and calibration of a new irregular cellular automata-based model for local urban growth simulation: The MUGICA model. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 46(2), 243–263. <https://doi.org/10.1177/2399808317709280>
- Barreira-González, P., & Barros, J. (2017). Configuring the neighbourhood effect in irregular cellular automata based models. *International Journal of Geographical Information Science*, 31(3), 617–636. <https://doi.org/10.1080/13658816.2016.1219035>
- Barreira-González, P., Gómez-Delgado, M., & Aguilera-Benavente, F. (2015). From raster to vector cellular automata models: A new approach to simulate urban growth with the help of graph theory. *Computers, Environment and Urban Systems*, 54, 119–131.
<https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.07.004>
- Batty, M. (1997). Cellular Automata and Urban Form : A Primer. *Journal Of the American Planning Association*, 63(2), 267–274.
- Batty, M. (2008). The size, scale, and shape of cities. In *Science* (Vol. 319, pp. 769–771).
<https://doi.org/10.1126/science.1151419>
- Batty, M. (2009). Urban Modeling. In N. Thrift & R. Kitchin (Eds.), *International Encyclopedia of Human Geography* (pp. 51–58). Elsevier. <http://www.genesis.ucl.ac.uk/>
- Batty, M. (2012). Building a science of cities. *Cities*, 29(SUPPL. 1), S9–S16.
<https://doi.org/10.1016/j.cities.2011.11.008>
- Batty, M. (2016). How disruptive is the smart cities movement? *Environment and Planning B: Planning and Design*, 43(3), 441–443. <https://doi.org/10.1177/0265813516645965>
- Batty, M. (2020a). Defining Complexity in Cities. In D. Pumain (Ed.), *Theories and Models of Urbanization. Geography, Economics and Computing Sciences* (pp. 13–26). Springer International Publishing.

- Batty, M. (2020b). How disruptive are new urban technologies? *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 47(1), 3–6. <https://doi.org/10.1177/2399808320902574>
- Batty, M., Couclelis, H., & Eichen, M. (1997). Urban systems as cellular automata. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 24(2), 159–305. <https://doi.org/10.1068/B240159>
- Batty, M., & Longley, P. A. (1986). The Fractal Simulation of Urban Structure. *Environment and Planning A*, 18(9), 1143–1179. <https://doi.org/10.1068/A181143>
- Batty, M., & Torrens, P. M. (2005). Modelling and prediction in a complex world. *Futures*, 37(7), 745–766. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2004.11.003>
- Batty, Michael. (1976). *Urban modelling : algorithms calibrations, predictions* (M. Batty, Ed.). Cambridge University Press.
- Baudin, T., & Stelter, R. (2022). The rural exodus and the rise of Europe. *Journal of Economic Growth*, 27(3), 365–414. <https://doi.org/10.1007/S10887-022-09206-4/FIGURES/16>
- Beach, L. R. (2021). Scenarios as narratives. *Futures & Foresight Science*, 3(1). <https://doi.org/10.1002/ffo2.58>
- Benabent-Fernández de Córdoba, M. (2016). Teorías de la planificación territorial: métodos de decisión. *Ciudad y Territorio Estudios Territoriales*, 353–368. <https://recyt.fecyt.es/index.php/CyTET/article/view/76487>
- Benabent-Fernández de Córdoba, M. (2019). La insoportable rigidez del Plan General Urbanístico. La necesidad de un cambio de modelo. *Ciudad y Territorio Estudios Territoriales*, 51(201), 451–466. <https://recyt.fecyt.es/index.php/CyTET/article/view/77536>
- Benenson, I., & Torrens, P. M. (2004). *Geosimulation. Automata-based modeling of urban phenomena*. Wiley.
- Berling-Wolff, S., & Wu, J. (2004). Modeling urban landscape dynamics: A review. In *Ecological Research* (Vol. 19).
- Bharath, H. A., Chandan, M. C., Vinay, S., & Ramachandra, T. V. (2018). Modelling urban dynamics in rapidly urbanising Indian cities. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 21(3), 201–210. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.08.002>
- Bhatta, B. (2010). Causes and Consequences of Urban Growth and Sprawl. In *Analysis of Urban Growth and Sprawl from Remote Sensing Data* (pp. 17–36). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-642-05299-6_2
- Bordoloi, R., Mote, A., Sarkar, P. P., & Mallikarjuna, C. (2013). Quantification of Land Use Diversity in The Context of Mixed Land Use. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104, 563–572. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.150>
- Börjeson, L., Höjer, M., Dreborg, K. H., Ekvall, T., & Finnveden, G. (2006). Scenario types and techniques: Towards a user's guide. *Futures*, 38(7), 723–739. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2005.12.002>
- Botequilha Leitão, A., & Ahern, J. (2002). Applying landscape ecological concepts and metrics in sustainable landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 59(2), 65–93. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(02\)00005-1](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00005-1)

- Bretagnolle, A., Pumain, D., & Vacchiani-Marcuzzo, C. (2009). The Organization of Urban Systems. *Complexity Perspectives in Innovation and Social Change*, 197–220. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9663-1_7
- Brodbeck, F. C., Kerschreiter, R., Mojzisch, A., Frey, D., & Schulz-Hardt, S. (2002). The dissemination of critical, unshared information in decision-making groups: the effects of pre-discussion dissent. *European Journal of Social Psychology*, 32(1), 35–56. <https://doi.org/10.1002/EJSP.74>
- Brown, B. B., Yamada, I., Smith, K. R., Zick, C. D., Kowaleski-Jones, L., & Fan, J. X. (2009). Mixed land use and walkability: Variations in land use measures and relationships with BMI, overweight, and obesity. *Health & Place*, 15(4), 1130–1141. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2009.06.008>
- Brunsdon, C., Fotheringham, A. S., & Charlton, M. E. (1996). Geographically Weighted Regression: A Method for Exploring Spatial Nonstationarity. *Geographical Analysis*, 28(4), 281–298. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1996.tb00936.x>
- Burriel de Orueta, E. L. (2008). La “década prodigiosa” del urbanismo español (1997-2006). *Scripta Nova*, XII(270 (64)). <https://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-270/sn-270-64.htm>
- Byrd, H., Matthewman, S., & Kenney, C. (2018). The Impact of Disruptive Technologies on Future Urban Form in New Zealand’s Cities. *Urbanism New Zealand Conference*, 1–14.
- Camacho Olmedo, M. T., Paegelow, M., Mas, J. F., & Escobar, F. (2018). *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios. An Introduction* (M. T. Camacho Olmedo, M. Paegelow, J. F. Mas, & F. Escobar, Eds.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60801-3_1
- Camacho Olmedo, M. T., Pontius, R. G., Paegelow, M., & Mas, J. F. (2015). Comparison of simulation models in terms of quantity and allocation of land change. *Environmental Modelling and Software*, 69, 214–221. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.03.003>
- Cantergiani, C., & Gómez Delgado, M. (2016). Diseño de un modelo basado en agentes para simular el crecimiento urbano en el Corredor del Henares (Comunidad de Madrid). *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 70, 259–283. <https://doi.org/10.21138/bage.2171>
- Cantergiani, C., & Gómez Delgado, M. (2020). Simulación del crecimiento urbano con AMEBA: Modelo Basado en Agentes para la ocupación residencial. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 86. <https://doi.org/10.21138/bage.2910>
- Carlos Moreno. (2023). *La revolución de la proximidad. De la ciudad «mundo» a la «ciudad de los 15 minutos»*. Alianza Editorial.
- Carsjens, G. J. (2009). *Supporting strategic spatial planning: Planning support systems for the spatial planning of metropolitan landscapes*. Wageningen Universiteit.
- Chadwick, G. F. (1978). *A systems view of planning : towards a theory of the urban and regional planning process* (G. F. Chadwick, Ed.; 2nd edition). Pergamon Press.
- Chakraborti, S., Das, D. N., Mondal, B., Shafizadeh-Moghadam, H., & Feng, Y. (2018). A neural network and landscape metrics to propose a flexible urban growth boundary: A case study. *Ecological Indicators*, 93, 952–965. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.036>

- Chakraborty, A. (2011). Enhancing the role of participatory scenario planning processes: Lessons from Reality Check exercises. *Futures*, 43(4), 387–399. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2011.01.004>
- Chakraborty, A., & McMillan, A. (2015). Scenario Planning for Urban Planners: Toward a Practitioner's Guide. *Journal of the American Planning Association*, 81(1), 18–29. <https://doi.org/10.1080/01944363.2015.1038576>
- Chaudhuri, G., & Clarke, K. (2013). The SLEUTH Land Use Change Model: A Review. *Environmental Resources Research*, 1(1), 88–105. <https://doi.org/10.22069/IJERR.2013.1688>
- Cheng, J., & Masser, I. (2004). Understanding spatial and temporal processes of urban growth : cellular automata modelling. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(1997), 167–194. <https://doi.org/10.1068/b2975>
- Christaller, W. (1933). *Die zentralen orte in suddeutschland*. Gustav Fischer.
- Christensen, C. M. (1997). *The Innovator's Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms to Fail* (C. Christensen, Ed.). Harvard Business Review Press.
- Ciari, F., & Becker, H. (2017). *How Disruptive Can Shared Mobility Be? A Scenario-Based Evaluation of Shared Mobility Systems Implemented at Large Scale* (pp. 51–63). https://doi.org/10.1007/978-3-319-51602-8_3
- Cochrane, L., & Corbett, J. (2018). Participatory Mapping. In *Handbook of Communication for Development and Social Change* (pp. 1–9). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7035-8_6-1
- Comer, D., & Greene, J. S. (2015). The development and application of a land use diversity index for Oklahoma City, OK. *Applied Geography*, 60, 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.02.015>
- Corburn, J. (2004). Confronting the Challenges in Reconnecting Urban Planning and Public Health. *American Journal of Public Health*, 94(4), 541–546. <https://doi.org/10.2105/AJPH.94.4.541>
- Corry, R. C., & Nassauer, J. I. (2005). Limitations of using landscape pattern indices to evaluate the ecological consequences of alternative plans and designs. *Landscape and Urban Planning*, 72(4), 265–280. <https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2004.04.003>
- Couclelis, H. (1997). From Cellular Automata to Urban Models: New Principles for Model Development and Implementation. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24, 165–174. <https://doi.org/10.1068/b240165>
- Criado, M., Martínez-Graña, A., Santos-Francés, F., Veleza, S., & Zazo, C. (2017). Multi-Criteria Analyses of Urban Planning for City Expansion: A Case Study of Zamora, Spain. *Sustainability*, 9, 1–18. <https://doi.org/10.3390/SU9101850>
- Crooks, A. T. (2010). Constructing and implementing an agent-based model of residential segregation through vector GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 24(5), 661–675. <https://doi.org/10.1080/13658810903569572>
- Cushman, S. A., Gutzweiler, K., Evans, J. S., & McGarigal, K. (2010). The gradient paradigm: A conceptual and analytical framework for landscape ecology. In *Spatial Complexity, Informatics, and Wildlife Conservation* (pp. 83–108). Springer Japan. https://doi.org/10.1007/978-4-431-87771-4_5/COVER

- Dahal, K. R., & Chow, T. E. (2015). Characterization of neighborhood sensitivity of an irregular cellular automata model of urban growth. *International Journal of Geographical Information Science*, 29(3), 475–497. <https://doi.org/10.1080/13658816.2014.987779>
- Davidoff, P., & Reiner, T. A. (2008). A Choice Theory of Planning. <Http://Dx.Doi.Org/10.1080/01944366208979427>, 28(2), 103–115. <https://doi.org/10.1080/01944366208979427>
- de Terán, F. (1999). Historia del urbanismo en España III. Siglos XIX y XX. In F. de Terán (Ed.), *CÁTEDRA* (CÁTEDRA). CÁTEDRA.
- Di Fiorino, M., Marunkevych, M., Madeira, L., & Figueira, M. L. (2022). An Unexpected War in Ukraine: What Should we Expect? The Consequences of War among Ukrainian Refugees. *Revista Portuguesa de Psiquiatria e Saúde Mental*, 8(2), 28–30. <https://doi.org/10.51338/rppsm.370>
- Díaz-Varela, E., Álvarez-López, C. J., & Marey-Pérez, M. F. (2009). Multiscale delineation of landscape planning units based on spatial variation of land-use patterns in Galicia, NW Spain. *Landscape and Ecological Engineering*, 5(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s11355-008-0053-4>
- Diefendorf, J. M. (1989). Urban Reconstruction in Europe After World War II. *Urban Studies*, 26(1), 128–143. <https://doi.org/10.1080/00420988920080101>
- Dietzel, C., & Clarke, K. (2006). The effect of disaggregating land use categories in cellular automata during model calibration and forecasting. *Computers, Environment and Urban Systems*, 30(1), 78–101. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2005.04.001>
- Dietzel, C., Herold, M., Hemphill, J. J., & Clarke, K. C. (2005). Spatio-temporal dynamics in California's Central Valley: Empirical links to urban theory. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(2), 175–195. <https://doi.org/10.1080/13658810410001713407>
- Dietzel, C., Oguz, H., Hemphill, J. J., Clarke, K. C., & Gazulis, N. (2005). Diffusion and Coalescence of the Houston Metropolitan Area: Evidence Supporting a New Urban Theory. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 32(2), 231–246. <https://doi.org/10.1068/b31148>
- Diksha, Kumar, A., & Tripathy, P. (2023). Geographically weighted regression to measure the role of intra-urban drivers for urban growth modelling in Kathmandu, Central Himalayas. *Environmental Monitoring and Assessment* 2023 195:5, 195(5), 1–23. <https://doi.org/10.1007/S10661-023-11164-2>
- Dror, Y. (1963). The Planning Process: A Facet Design. *International Review of Administrative Sciences*, 29(1), 46–58. <https://doi.org/10.1177/002085236302900108>
- Du, G. (2000). Using GIS for analysis of urban systems. *GeoJournal*, 52(3), 213–221. <https://doi.org/10.1023/A:1014268007599/METRICS>
- Duguma, D. W., Schultner, J., Abson, D. J., & Fischer, J. (2022). From stories to maps: translating participatory scenario narratives into spatially explicit information. *Ecology and Society*, 27(2), art13. <https://doi.org/10.5751/ES-13200-270213>
- Duque, J. C., Velásquez, H., & Agudelo, J. (2011). Infraestructura pública y precios de vivienda : una aplicación de regresión geográficamente ponderada en el contexto de precios hedónicos. *Ecos de ECONOMÍA*, 33, 95–122.

- Eggimann, S. (2022). The potential of implementing superblocks for multifunctional street use in cities. *Nature Sustainability*. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00855-2>
- Epstein, J. M. (2008). *Why Model? Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 412(11)
- Esteban Noguera, J. (2011). La ordenación urbanística: conceptos, herramientas y prácticas. In J. Esteban Noguera (Ed.), *Iniciativa Digital Politécnica*. Universidad Politécnica de Barcelona.
- Ewing, R., & Hamidi, S. (2015). Compactness versus Sprawl. *Journal of Planning Literature*, 30(4), 413–432. <https://doi.org/10.1177/0885412215595439>
- Fernández Güell, J. M. (2006). *Planificación estratégica de ciudades: Nuevos instrumentos y procesos* (J. M. Fernández Güell, Ed.; Reverté). Reverté. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Fischler, R. (2012). Fifty Theses on Urban Planning and Urban Planners. *Journal of Planning Education and Research*, 32(1), 107–114. <https://doi.org/10.1177/0739456X11420441>
- Fitting, P. (2002). Urban Planning/Utopian Dreaming: Le Corbusier's Chandigarh Today. *Utopian Studies*, 13(1), 69–93.
- Forman, R. T. T. (1995). Some general principles of landscape and regional ecology. *Landscape Ecology*, 10(3), 133–142. <https://doi.org/10.1007/BF00133027/METRICS>
- Fotheringham, A. S., Brunsdon, C., & Charlton, M. (2002). *Geographically weighted regression. The analysis of spatially varying relationships* (A. S. Fotheringham, C. Brunsdon, & M. Charlton, Eds.). Ltd, John Wiley & Sons.
- Franco, D., Bombonato, A., Mannino, I., Ghetti, P., & Zanetto, G. (2005). The evaluation of a planning tool through the landscape ecology concepts and methods. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 16(1), 55–70. <https://doi.org/10.1108/14777830510574344>
- Frankhauser, P. (1998). The Fractal Approach. A New Tool for the Spatial Analysis of Urban Agglomerations. *New Methodological Approaches in the Social Sciences*, 10(1), 205–240. <https://about.jstor.org/terms>
- Frankhauser, P. (2004). *Comparing the morphology of urban patterns in Europe – a fractal approach*. 2, 79–105.
- Frazier, A. E., & Kedron, P. (2017). Landscape Metrics: Past Progress and Future Directions. *Current Landscape Ecology Reports* 2017 2:3, 2(3), 63–72. <https://doi.org/10.1007/S40823-017-0026-0>
- Gallardo, M. (2018). Revisión y análisis de estudios de modelos de cambios de usos del suelo y de escenarios a futuro. *Geographicalia*, 70, 1–26. https://doi.org/10.26754/OJS_GEOPH/GEOPH.2018703278
- Gao, J., & Li, S. (2011). Detecting spatially non-stationary and scale-dependent relationships between urban landscape fragmentation and related factors using Geographically Weighted Regression. *Applied Geography*, 31(1), 292–302. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.06.003>

- Gavanas, N. (2019). Autonomous Road Vehicles: Challenges for Urban Planning in European Cities. *Urban Science 2019*, Vol. 3, Page 61, 3(2), 61.
<https://doi.org/10.3390/URBANSCI3020061>
- Ghose, R. (2018). Defining Public Participation GIS. In *Comprehensive Geographic Information Systems* (Vol. 3, pp. 431–437). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09630-5>
- Gold, J. R. (2019). Athens Charter (CIAM), 1933. In *The Wiley Blackwell Encyclopedia of Urban and Regional Studies* (pp. 1–3). Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9781118568446.eurs0013>
- Gómez Delgado, M., & Rodríguez Espinosa, V. (2012). *Análisis de la dinámica urbana y simulación de escenarios de desarrollo futuro con Tecnologías de la Información Geográfica*. RA-MA.
- Gómez Orea, D., & Gómez Villarino, A. (2013). *Ordenación Territorial* (D. Gómez Orea & A. Gómez Villarino, Eds.; 3.^a edición). Ediciones Mundi-Prensa.
- Goodspeed, R. (2020). *Scenario Planning for Cities and Regions: Managing and Envisioning Uncertain Futures*. Lincoln Institute of Land Policy.
<https://books.google.es/books?id=SffpywEACAAJ>
- Graham Romeyn, T. (1915). *Satellite Cities: A Study of Industrial Suburbs*, by Graham Romeyn Taylor (D. Appleton). D. Appleton.
- Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X., & Briggs, J. M. (2008). Global change and the ecology of cities. *Science*, 319(5864), 756–760.
<https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1150195>
- Guan, D., Li, H., Inohae, T., Su, W., Nagaie, T., & Hokao, K. (2011). Modeling urban land use change by the integration of cellular automaton and Markov model. *Ecological Modelling*, 222(20–22), 3761–3772. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.09.009>
- Guan, Q., & Clarke, K. C. (2010). A general-purpose parallel raster processing programming library test application using a geographic cellular automata model. *International Journal of Geographical Information Science*, 24(5), 695–722.
<https://doi.org/10.1080/13658810902984228>
- Guan, Q., Shi, X., Huang, M., & Lai, C. (2015). A hybrid parallel cellular automata model for urban growth simulation over GPU/CPU heterogeneous architectures. *International Journal Of Geographical Information Science*, 30(3), 494–514.
<https://doi.org/10.1080/13658816.2015.1039538>
- Hagerstrand, T. (1968). Innovation diffusion as a spatial process. *Innovation Diffusion as a Spatial Process*.
- Hall, P. (1996). *Ciudades del mañana. Historia del urbanismo en el siglo XX* (P. Hall, Ed.; Ediciones del Serbal). Ediciones del Serbal.
- Hall, P. (2002). *Urban and Regional Planning* (P. Hall, Ed.; Fourth edition). Routledge.
- Hamnett, C., & Whitelegg, D. (2007). Loft conversion and gentrification in London: From industrial to postindustrial land use. *Environment and Planning A*, 39(1), 106–124.
<https://doi.org/10.1068/a38474>

- Harb, M., Garschagen, M., Cotti, D., Krätzschmar, E., Baccouche, H., ben Khaled, K., Bellert, F., Chebil, B., ben Fredj, A., Ayed, S., Shekhar, H., & Hagenlocher, M. (2020). Integrating Data-Driven and Participatory Modeling to Simulate Future Urban Growth Scenarios: Findings from Monastir, Tunisia. *Urban Science*, 4(1), 10. <https://doi.org/10.3390/urbansci4010010>
- Hashim, M., Mohd Noor, N., & Marghany, M. (2011). Modeling sprawl of unauthorized development using geospatial technology: case study in Kuantan district, Malaysia. *International Journal of Digital Earth*, 4(3), 223–238. <https://doi.org/10.1080/17538947.2010.494737>
- He, H. S., Dezonias, B. E., & Mladenoff, D. J. (2000). An aggregation index (AI) to quantify spatial patterns of landscapes. *Landscape Ecology*, 15, 591–601.
- Herold, M., Couclelis, H., & Clarke, K. C. (2005). The role of spatial metrics in the analysis and modeling of urban land use change. *Computers, Environment and Urban Systems*, 29(4), 369–399. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2003.12.001>
- Herold, M., Goldstein, N. C., & Clarke, K. C. (2003). The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modeling. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 286–302. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00075-0](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00075-0)
- Hewitt, R., van Delden, H., & Escobar, F. (2014). Participatory land use modelling, pathways to an integrated approach. *Environmental Modelling and Software*, 52, 149–165. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.10.019>
- Hickman, R., & Banister, D. (2014). Transport, Climate Change and the City. In *Transport, Climate Change and the City*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203074435>
- Höjer, M., Gullberg, A., & Pettersson, R. (2011). Backcasting images of the future city—Time and space for sustainable development in Stockholm. *Technological Forecasting and Social Change*, 78(5), 819–834. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2011.01.009>
- Hopkins, L. D., & Zapata, M. A. (2007). Engaging the future. Forecasts, Scenarios, Plans and Projects. In Intergovernmental Panel on Climate Change (Ed.), *Tools for Effective Planning Practices* (pp. 1–30). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Houet, T., Marchadier, C., Bretagne, G., Moine, M. P., Aguejdad, R., Viguié, V., Bonhomme, M., Lemonsu, A., Avner, P., Hidalgo, J., & Masson, V. (2016). Combining narratives and modelling approaches to simulate fine scale and long-term urban growth scenarios for climate adaptation. *Environmental Modelling & Software*, 86, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.09.010>
- Hu, Z., & Lo, C. P. (2007). Modeling urban growth in Atlanta using logistic regression. *Computers, Environment and Urban Systems*, 31(6), 667–688. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2006.11.001>
- Ichimura, M. (2003). *Urbanization, Urban Environment and Land Use: Challenges and Opportunities An Issue Paper*.
- Jacobs, J. (1961). The death and life of great american cities. In J. Jacobs (Ed.), *Random House*. Random House.
- Javier, F., & Morales, L. (2016). La Carta de Venecia en el siglo XXI. *Gremium, ISSN-e 2007-8773, Vol. 3, Nº. 5, 2016, Págs. 29-39, 3(5), 29–39*.

- Jenerette, G. D., & Wu, J. (2001). Analysis and simulation of land-use change in the central Arizona - Phoenix region, USA. *Landscape Ecology*, *16*(7), 611–626. <https://doi.org/10.1023/A:1013170528551>
- Jiang, F., Liu, S., Yuan, H., & Zhang, Q. (2007). Measuring urban sprawl in Beijing with geo-spatial indices. *Journal of Geographical Sciences*, *17*(4), 469–478. <https://doi.org/10.1007/s11442-007-0469-z>
- Jjumba, A., & Dragičević, S. (2012). High Resolution Urban Land-use Change Modeling: Agent iCity Approach. *Applied Spatial Analysis and Policy*, *5*(4), 291–315. <https://doi.org/10.1007/s12061-011-9071-y>
- Juan Calatrava. (2016). El París de Haussmann como territorio de la utopía: Victor Fournel (1865) y Victor Hugo (1867). *Quintana*, *15*, 53–71.
- Jun, M. J., & Moore, J. E. (2002). The Lowry Model Revisited: Incorporating a Multizonal Input-Output Model into an Urban Land Use Allocation Model. *Review of Urban & Regional Development Studies*, *14*(1), 2–17. <https://doi.org/10.1111/1467-940X.00045>
- Junghans, L., Kreft, S., & Welp, M. (2018). Inclusive Visions for Urban Transitions: Lessons from stakeholder dialogues in Asian medium sized cities. *Sustainable Cities and Society*, *42*(February 2017), 512–520. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.003>
- Kaczorowska, A., Kain, J. H., Kronenberg, J., & Haase, D. (2016). Ecosystem services in urban land use planning: Integration challenges in complex urban settings—Case of Stockholm. *Ecosystem Services*, *22*, 204–212. <https://doi.org/10.1016/J.ECOSER.2015.04.006>
- Karakiewicz, J. (2016). Interventions in Complex Urban Systems: How to Enable Modeling to Account for Disruptive Innovation. In C. Walloth, E. Gebetsroither-Geringer, F. Atun, & L. C. Werner (Eds.), *Understanding Complex Urban Systems: Integrating Multidisciplinary Data in Urban Models* (pp. 113–127). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30178-5_8
- Kaviari, F., Mesgari, M. S., Seidi, E., & Motieyan, H. (2019). Simulation of urban growth using agent-based modeling and game theory with different temporal resolutions. *Cities*, *95*, 10–23. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.06.018>
- Ke, X., Qi, L., & Zeng, C. (2016). A partitioned and asynchronous cellular automata model for urban growth simulation. *International Journal of Geographical Information Science*, *30*(4), 637–659. <https://doi.org/10.1080/13658816.2015.1084510>
- Kim, J., Kang, Y., Hong, S., & Park, S. (2006). Extraction of spatial rules using a decision tree method: A case study in Urban growth modeling. *Lecture Notes in Computer Science*, 203–211. https://doi.org/10.1007/11892960_25
- Kingston, R., Carver, S., Evans, A., & Turton, I. (2000). Web-based public participation geographical information systems: an aid to local environmental decision-making. *Computers, Environment and Urban Systems*, *24*(2), 109–125. [https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(99\)00049-6](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(99)00049-6)
- Kok, K., & van Delden, H. (2009). Combining two approaches of integrated scenario development to combat desertification in the Guadalentín watershed, Spain. *Environment and Planning B: Planning and Design*, *36*(1), 49–66. <https://doi.org/10.1068/b32137>
- Kok, K., & van Delden, H. (2013). Linking Narrative Storylines and Quantitative Models to Combat Desertification in the Guadalentín Watershed (Spain). In M. Giaoutzi & B. Sapio

- (Eds.), *Recent Developments in Foresight Methodologies* (pp. 203–2014). Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5215-7>
- Kumar, V., Singh, V. K., Gupta, K., & Jha, A. K. (2021). Integrating Cellular Automata and Agent-Based Modeling for Predicting Urban Growth: A Case of Dehradun City. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1007/s12524-021-01418-2>
- Laird, J. (2014). Evaluating transport and land use interventions in the face of disruption. *Universities' Transport Study Group*, 1–14.
- Lami, I. M. (2020). *Abandoned Buildings in Contemporary Cities: Smart Conditions for Actions* (Vol. 168). <http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-35550-0>
- Lang, S., & Tiede, D. (2003). *vLATE Extension für ArcGIS – vektorbasiertes Tool zur quantitativen Landschaftsstrukturanalyse*.
- Lau, K. H., & Kam, B. H. (2005). A Cellular Automata Model for Urban Land-Use Simulation. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 32(2), 247–263.
<https://doi.org/10.1068/b31110>
- Leao, S., Bishop, I., & Evans, D. (2004). Simulating Urban Growth in a Developing Nation's Region Using a Cellular Automata-Based Model. *Journal of Urban Planning and Development*, 130(3), 145–158. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9488\(2004\)130:3\(145\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9488(2004)130:3(145))
- Lehmann, S. (2011). What is Green Urbanism? Holistic Principles to Transform Cities for Sustainability. In J. Blanco & H. Kheradmand (Eds.), *Climate Change - Research and Technology for Adaptation and Mitigation* (pp. 243–266). InTechOpen.
<https://doi.org/10.5772/23957>
- Levy, J. M. (2016). *Contemporary Urban Planning* (11th Edition). Routledge: Taylor & Francis Group.
- Li, C., Li, J., & Wu, J. (2018). What drives urban growth in China? A multi-scale comparative analysis. *Applied Geography*, 98(June), 43–51.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.07.002>
- Li, X., & Gong, P. (2016). Urban growth models: progress and perspective. *Science Bulletin*, 61(21), 1637–1650. <https://doi.org/10.1007/S11434-016-1111-1>
- Li, X., Zhang, X., Yeh, A., & Liu, X. (2010). Parallel cellular automata for large-scale urban simulation using load-balancing techniques. *International Journal Of Geographical Information Science*, 24(6), 803–820. <https://doi.org/10.1080/13658810903107464>
- Liang, X., Guan, Q., Clarke, K. C., Chen, G., Guo, S., & Yao, Y. (2021). Mixed-cell cellular automata: A new approach for simulating the spatio-temporal dynamics of mixed land use structures. *Landscape and Urban Planning*, 205, 103960.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103960>
- Liang, X., Liu, X., Li, D., Zhao, H., & Chen, G. (2018). Urban growth simulation by incorporating planning policies into a CA-based future land-use simulation model. *International Journal of Geographical Information Science*, 32(11), 2294–2316.
<https://doi.org/10.1080/13658816.2018.1502441>
- Liao, J., Shao, G., Wang, C., Tang, L., Huang, Q., & Qiu, Q. (2019). Urban sprawl scenario simulations based on cellular automata and ordered weighted averaging ecological constraints. *Ecological Indicators*, 107, 55–72.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105572>

- Lippe, M., Thai Minh, T., Neef, A., Hilger, T., Hoffmann, V., Lam, N. T., & Cadisch, G. (2011). Building on qualitative datasets and participatory processes to simulate land use change in a mountain watershed of Northwest Vietnam. *Environmental Modelling & Software*, 26(12), 1454–1466. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2011.07.009>
- Liu, X., & Andersson, C. (2004). Assessing the impact of temporal dynamics on land-use change modeling. *Computers, Environment and Urban Systems*, 28(1–2), 107–124. [https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(02\)00045-5](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(02)00045-5)
- Liu, X., Li, X., Chen, Y., Tan, Z., Li, S., & Ai, B. (2010). A new landscape index for quantifying urban expansion using multi-temporal remotely sensed data. *Landscape Ecology*, 25(5), 671–682. <https://doi.org/10.1007/s10980-010-9454-5>
- Liu, Z., He, C., Zhou, Y., & Wu, J. (2014). How much of the world's land has been urbanized, really? A hierarchical framework for avoiding confusion. *Landscape Ecology*, 29(5), 763–771. <https://doi.org/10.1007/S10980-014-0034-Y>
- Lobato-Becerra, J. A. (2020). Notas sobre la obsolescencia de los planes generales. Planificación estratégica y modelo urbano. *Ciudad y Territorio. Estudios Territoriales*, 48(204), 197–210. <https://doi.org/10.37230/CyTET.2020.204.01>
- Lois, R. C., González, J. M., & Escudero, L. A. (2012). *Los espacios urbanos. El estudio geográfico de la ciudad y la urbanización* (R. C. Lois, J. M. González, & L. A. Escudero, Eds.; Biblioteca Nueva). Biblioteca Nueva.
- López de Lucio, R. (1993). *Ciudad y urbanismo a finales del siglo XX*. 280.
- Lowry, I. (1964). *A Model of Metropolis* (I. S. Lowry, Ed.). The Rand Corporation.
- Lowry, J. H., & Lowry, M. B. (2014). Comparing spatial metrics that quantify urban form. *Computers, Environment and Urban Systems*, 44, 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2013.11.005>
- Lu, Y., Cao, M., & Zhang, L. (2015). A vector-based Cellular Automata model for simulating urban land use change. *Chinese Geographical Science*, 25(1), 74–84. <https://doi.org/10.1007/s11769-014-0719-9>
- Luck, M., & Wu, J. (2002). A gradient analysis of urban landscape pattern: A case study from the Phoenix metropolitan region, Arizona, USA. *Landscape Ecology*, 17(4), 327–339. <https://doi.org/10.1023/A:1020512723753>
- Maclean, M. G., & Congalton, R. G. (2013). PolyFrag: a vector-based program for computing landscape metrics. <Http://Dx.Doi.Org/10.1080/15481603.2013.856537>, 50(6), 591–603. <https://doi.org/10.1080/15481603.2013.856537>
- Madge, J. (1962). The New Towns Program In Britain. *Journal of the American Institute of Planners*, 28(4), 208–219. <https://doi.org/10.1080/01944366208979447>
- Mallampalli, V. R., Mavrommati, G., Thompson, J., Duveneck, M., Meyer, S., Ligmann-Zielinska, A., Druschke, C. G., Hychka, K., Kenney, M. A., Kok, K., & Borsuk, M. E. (2016). Methods for translating narrative scenarios into quantitative assessments of land use change. *Environmental Modelling and Software*, 82, 7–20. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.04.011>

- Mallick, S. K., Rudra, S., & Maity, B. (2023). Unplanned urban built-up growth creates problem in human adaptability: Evidence from a growing up city in eastern Himalayan foothills. *Applied Geography*, *150*, 102842. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOG.2022.102842>
- Manaugh, K., & Kreider, T. (2013). What is mixed use? Presenting an interaction method for measuring land use mix. *Journal of Transport and Land Use*, *6*(1), 63. <https://doi.org/10.5198/jtlu.v6i1.291>
- McGarigal, K. (2012). Landscape Pattern Metrics. In A. H. El-Shaarawi & W. W. Piegorsch (Eds.), *Encyclopedia of Environmetrics*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470057339.val006.pub2>
- Mcgarigal, K., & Cushman, S. A. (2005). The gradient concept of landscape structure. In: *Wiens, John A.; Moss, Michael R., Eds. Issues and Perspectives in Landscape Ecology. Cambridge University Press. p. 112-119.*, 112–119. <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/52867>
- Melander, L. (2018). Scenario development in transport studies: Methodological considerations and reflections on delphi studies. *Futures*, *96*, 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2017.11.007>
- Mendonça, S., Pina e Cunha, M., Kaivo-oja, J., & Ruff, F. (2004). Wild cards, weak signals and organisational improvisation. *Futures*, *36*(2), 201–218. [https://doi.org/10.1016/S0016-3287\(03\)00148-4](https://doi.org/10.1016/S0016-3287(03)00148-4)
- Millar, C., Lockett, M., & Ladd, T. (2018). Disruption: Technology, innovation and society. *Technological Forecasting and Social Change*, *129*, 254–260. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.10.020>
- Mirbagheri, B., & Alimohammadi, A. (2017). Improving urban cellular automata performance by integrating global and geographically weighted logistic regression models. *Transactions in GIS*, *21*(6), 1280–1297. <https://doi.org/10.1111/tgis.12278>
- Mondal, B., Das, D. N., & Dolui, G. (2015). Modeling spatial variation of explanatory factors of urban expansion of Kolkata: a geographically weighted regression approach. *Modeling Earth Systems and Environment*, *1*(4), 29. <https://doi.org/10.1007/s40808-015-0026-1>
- Moreno, N., Ménard, A., & Marceau, D. J. (2008). VecGCA: A Vector-Based Geographic Cellular Automata Model Allowing Geometric Transformations of Objects. *Environment and Planning B: Planning and Design*, *35*(4), 647–665. <https://doi.org/10.1068/b33093>
- Moser, B., Jaeger, J. A. G., Tappeiner, U., Tasser, E., & Eiselt, B. (2007). Modification of the effective mesh size for measuring landscape fragmentation to solve the boundary problem. *Landscape Ecology*, *22*(3), 447–459. <https://doi.org/10.1007/s10980-006-9023-0>
- Musa, S. I., Hashim, M., & Reba, M. N. M. (2017). A review of geospatial-based urban growth models and modelling initiatives. In *Geocarto International* (Vol. 32, Issue 8, pp. 813–833). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/10106049.2016.1213891>
- Mustafa, A. M., Saadi, I., Cools, M., & Teller, J. (2015). Modelling Uncertainties in Long-Term Predictions of Urban Growth: A Coupled Cellular Automata and Agent-Based Approach. *Computational Urban Planning and Urban Management*, 284–301.
- Neurath, O., & Gómez Ramos, A. (1993). La Viena roja. *Ediciones de Intervención Cultural*, *54*, 97–107. <https://www.jstor.org/stable/27820066>

- O'Neill, R. V., Krummel, J. R., Gardner, R. H., Sugihara, G., Jackson, B., DeAngelis, D. L., Milne, B. T., Turner, M. G., Zygmunt, B., Christensen, S. W., Dale, V. H., & Graham, R. L. (1988). Indices of landscape pattern. *Landscape Ecology*, *1*(3), 153–162. <https://doi.org/10.1007/BF00162741>
- Openshaw, S. (1983). *The modifiable areal unit problem*. GeoBooks.
- O'Sullivan, D. (2001). Graph-cellular automata: A generalised discrete urban and regional model. *Environment and Planning B: Planning and Design*, *28*(5), 687–705. <https://doi.org/10.1068/b2707>
- Pettit, C., & Pullar, D. (2004). A Way Forward for Land-Use Planning to Achieve Policy Goals by Using Spatial Modelling Scenarios. *Environment and Planning B: Planning and Design*, *31*(2), 213–233. <https://doi.org/10.1068/b3024>
- Pijanowski, B. C., Tayyebi, A., Doucette, J., Pekin, B. K., Braun, D., & Plourde, J. (2014). A big data urban growth simulation at a national scale: Configuring the GIS and neural network based Land Transformation Model to run in a High Performance Computing (HPC) environment. *Environmental Modelling & Software*, *51*, 250–268. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.09.015>
- Pinto, N. N., & Antunes, A. P. (2010). A cellular automata model based on irregular cells: Application to small urban areas. *Environment and Planning B: Planning and Design*, *37*(6), 1095–1114. <https://doi.org/10.1068/b36033>
- Plata Rocha, W., Bosque Sendra, J., & Gómez Delgado, M. (2011). Análisis de factores explicativos del crecimiento urbano en la Comunidad de Madrid a través de métodos estadísticos y SIG. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG)*, *3*(I), 201–230.
- Plata Rocha, W., Gómez-Delgado, M., & Bosque-Sendra, J. (2011). Simulating urban growth scenarios using GIS and multicriteria analysis techniques: A case study of the Madrid region, Spain. *Environment and Planning B: Planning and Design*, *38*(6), 1012–1031. <https://doi.org/10.1068/b37061>
- Plata Rocha, W., & Rojas Quezada, C. (2010). Área Metropolitana de Concepción : Factores espaciales explicativos de su crecimiento urbano reciente (2001-2009) por medio de un Modelo de Regresión Logística Espacial. *Postgrados UNAH*, *2*(4), 124–136.
- Polidoro, M., De Lollo, J. A., Vizintim, M., & Barros, F. (2012). Urban Sprawl and the Challenges for Urban Planning. *Journal of Environmental Protection*, *2012*(09), 1010–1019. <https://doi.org/10.4236/JEP.2012.39117>
- Pontius, G. R., & Malanson, J. (2007). Comparison of the structure and accuracy of two land change models. <https://doi.org/10.1080/13658810410001713434>, *19*(2), 243–265. <https://doi.org/10.1080/13658810410001713434>
- Pontius Jr., R. G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *101*(2–3), 251–268. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.008>
- Pontius, R. G., Peethambaram, S., & Castella, J. C. (2011). Comparison of three maps at multiple resolutions: A case study of land change simulation in cho don district, Vietnam. *Annals of the Association of American Geographers*, *101*(1), 45–62. <https://doi.org/10.1080/00045608.2010.517742>

- Poudyal, N. C., Hodges, D. G., Tonn, B., & Cho, S.-H. (2009). Valuing diversity and spatial pattern of open space plots in urban neighborhoods. *Forest Policy and Economics*, *11*(3), 194–201. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2009.02.007>
- Pritsker, A. A. B. (1979). Compilation of definitions of simulation. *Simulation*, *33*(2), 61–63. <https://doi.org/10.1177/003754977903300205>
- Pumain, D., & Reuillon, R. (2017). *Urban Dynamics and Simulation Models* (D. Pumain & R. Reuillon, Eds.). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-46497-8>
- Puyol, R. (2012). Del campo a la ciudad. El proceso de urbanización en el mundo. *Cultura, Sociedad/Ciudades*, *138*. <https://reunir.unir.net/handle/123456789/5490>
- Rampel, R. S. (2008). *Patch Analyst*. <https://learn.opengeoedu.de/en/monitoring/landschaftstrukturmasse/software/patch-analyst-arcmap-plugin>
- Reis, J. P., Silva, E. A., & Pinho, P. (2016). Spatial metrics to study urban patterns in growing and shrinking cities. *Urban Geography*, *37*(2), 246–271. <https://doi.org/10.1080/02723638.2015.1096118>
- Richardson, H. W. (1995). Economies and Diseconomies of Agglomeration. In *Urban Agglomeration and Economic Growth* (pp. 123–155). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79397-4_6
- Rifat, S. A. Al, & Liu, W. (2022). Predicting future urban growth scenarios and potential urban flood exposure using Artificial Neural Network-Markov Chain model in Miami Metropolitan Area. *Land Use Policy*, *114*, 105994. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.105994>
- Ritsema van Eck, J., & Koomen, E. (2008). Characterising urban concentration and land-use diversity in simulations of future land use. *The Annals of Regional Science*, *42*(1), 123–140. <https://doi.org/10.1007/s00168-007-0141-7>
- Rodrigues, C., & Freire, F. (2017). Adaptive reuse of buildings: Eco-efficiency assessment of retrofit strategies for alternative uses of an historic building. *Journal of Cleaner Production*, *157*, 94–105. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.104>
- Rodrigues da Silva, B. C. (2015). *Brasil, la reinención de la modernidad : Le Corbusier, Lúcio Costa, Oscar Niemeyer* [Universidad Politécnica de Madrid]. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.43304>
- Romanillos, G. (2016). Collaborative mapping of emerging cities in developing countries: the León Emergente project. *Journal of Maps*, *12*, 584–590. <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1239557>
- Rueda Palenzuela, S., Santasusagna Riu, A., Cormenzana Izquierdo, B., Tort Donada, J., & Úbeda, X. (2022). Understanding Urban Complexity via the Spatial Diversity of Activities: An Application to Barcelona (Spain). *Sustainability*, *14*(3), 1298. <https://doi.org/10.3390/su14031298>
- Rzeszewski, M., & Kotus, J. (2019). Usability and usefulness of internet mapping platforms in participatory spatial planning. *Applied Geography*, *103*, 56–69. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2019.01.001>

- Sadooghi, S. E., Taleai, M., & Abolhasani, S. (2022). Simulation of urban growth scenarios using integration of multi-criteria analysis and game theory. *Land Use Policy*, *120*, 106267. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2022.106267>
- Salvati, L., & Carlucci, M. (2020). Shaping Dimensions of Urban Complexity: The Role of Economic Structure and Socio-Demographic Local Contexts. *Social Indicators Research*, *147*(1), 263–285. <https://doi.org/10.1007/S11205-019-02156-2/FIGURES/5>
- Saritas, O., & Smith, J. E. (2011). The Big Picture – trends, drivers, wild cards, discontinuities and weak signals. *Futures*, *43*(3), 292–312. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2010.11.007>
- Scheel, C., & Rivera, A. (2013). Innovative cities: in search of their disruptive characteristics. *International Journal of Knowledge-Based Development*, *4*(1), 79. <https://doi.org/10.1504/IJKBD.2013.052496>
- Schoemaker, P. J. H. (1995). Scenario Planning: A Tool for Strategic Thinking. *MIT Sloan Management Review*, *36*, 25–40.
- Schwartz, P. (1996). *The Art of the Long View: Planning for the Future in an Uncertain World*. Currency.
- Sevilla Buitrago, Á., Castrillo Romón, M. Á., Matesanz Parellada, Á., & Sánchez Fuentes, D. (2014). ¿Regeneración urbana? Deconstrucción y reconstrucción de un concepto incuestionado. *Papeles de Relaciones Ecosociales y Cambio Global*, ISSN 1888-0576, 2014, No. 126. https://www.fuhem.es/media/cdv/file/biblioteca/revista_papeles/126/Regeneracion_urbana_M_Castrillo_A_Matesanz_D_Sanchez_Fuentes_A_Sevilla.pdf
- Shafizadeh-Moghadam, H., Tayyebi, A., & Helbich, M. (2017). Transition index maps for urban growth simulation: application of artificial neural networks, weight of evidence and fuzzy multi-criteria evaluation. *Environmental Monitoring and Assessment*, *189*(6). <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5986-3>
- Shifan, Y., Kaplan, S., & Hakkert, S. (2003). Scenario building as a tool for planning a sustainable transportation system. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *8*(5), 323–342. [https://doi.org/10.1016/S1361-9209\(03\)00020-8](https://doi.org/10.1016/S1361-9209(03)00020-8)
- Shiple, R. (2002). Visioning in Planning: Is the Practice Based on Sound Theory? *Environment and Planning A: Economy and Space*, *34*(1), 7–22. <https://doi.org/10.1068/a3461>
- Shurupov, N., Delgado, M. G., & Párraga, J. C. (2022). Simulación de la construcción residencial mediante un modelo basado en agentes. *XIX Congreso de Tecnologías de La Información Geográfica*, 553–562.
- Song, Y., Merlin, L., & Rodriguez, D. (2013). Comparing measures of urban land use mix. *Computers, Environment and Urban Systems*, *42*, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2013.08.001>
- Soria-Lara, J. A., Ariza-Álvarez, A., Aguilera-Benavente, F., Cascajo, R., Arce-Ruiz, R. M., López, C., & Gómez-Delgado, M. (2021). Participatory visioning for building disruptive future scenarios for transport and land use planning. *Journal of Transport Geography*, *90*(December 2019), 102907. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102907>
- Soria-Lara, J. A., & Banister, D. (2017). Participatory visioning in transport backcasting studies: Methodological lessons from Andalusia (Spain). *Journal of Transport Geography*, *58*, 113–126. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.11.012>

- Soria-Lara, J. A., & Banister, D. (2018a). Collaborative backcasting for transport policy scenario building. *Futures*, *95*, 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2017.09.003>
- Soria-Lara, J. A., & Banister, D. (2018b). Evaluating the impacts of transport backcasting scenarios with multi-criteria analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *110*, 26–37. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.02.004>
- Soros, G. (2013). Fallibility, reflexivity, and the human uncertainty principle. *Journal of Economic Methodology*, *20*(4), 309–329. <https://doi.org/10.1080/1350178X.2013.859415>
- Steiner, G. A. (1979). *Strategic planning. What every manager must know*. (G. A. Steiner, Ed.). The Free Press.
- Stevens, D., & Dragičević, S. (2007). A GIS-based irregular cellular automata model of land-use change. *Environment and Planning B: Planning and Design*, *34*(4), 708–724. <https://doi.org/10.1068/b32098>
- Stevens, D., Dragicevic, S., & Rothley, K. (2007). iCity: A GIS-CA modelling tool for urban planning and decision making. *Environmental Modelling & Software*, *22*(6), 761–773. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.02.004>
- Store, R., & Kangas, J. (2001). Integrating spatial multi-criteria evaluation and expert knowledge for GIS-based habitat suitability modelling. *Landscape and Urban Planning*, *55*(2), 79–93. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(01\)00120-7](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(01)00120-7)
- Su, S., Xiao, R., & Zhang, Y. (2012). Multi-scale analysis of spatially varying relationships between agricultural landscape patterns and urbanization using geographically weighted regression. *Applied Geography*, *32*(2), 360–375. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.06.005>
- Sudhira, H. S., Ramachandra, T. V., & Jagadish, K. S. (2004). Urban sprawl: metrics, dynamics and modelling using GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *5*(1), 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2003.08.002>
- Swetnam, R. D., Fisher, B., Mbilinyi, B. P., Munishi, P. K. T., Willcock, S., Ricketts, T., Mwakalila, S., Balmford, A., Burgess, N. D., Marshall, A. R., & Lewis, S. L. (2011). Mapping socio-economic scenarios of land cover change: A GIS method to enable ecosystem service modelling. *Journal of Environmental Management*, *92*(3), 563–574. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2010.09.007>
- Szymanowski, M., & Kryza, M. (2011). Application of geographically weighted regression for modelling the spatial structure of urban heat island in the city of Wrocław (SW Poland). *Procedia Environmental Sciences*, *3*, 87–92. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.02.016>
- Talen, E. (2005). Land Use Zoning and Human Diversity : Exploring the Connection. *Journal of Urban Planning and Development*, *131*(4), 214–232. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9488\(2005\)131:4\(214\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9488(2005)131:4(214))
- Tannier, C., Thomas, I., Vuidel, G., & Frankhauser, P. (2011). A Fractal Approach to Identifying Urban Boundaries. *Geographical Analysis*, *43*(2), 211–227. <https://doi.org/10.1111/J.1538-4632.2011.00814.X>
- Tian, Y., Shuai, Y., Ma, X., Shao, C., Liu, T., & Tuerhanjiang, L. (2022). Improved Landscape Expansion Index and Its Application to Urban Growth in Urumqi. *Remote Sensing* *2022*, Vol. 14, Page 5255, *14*(20), 5255. <https://doi.org/10.3390/RS14205255>

- Timpe, C., & Scheepers, M. J. J. (2003). A look into the future: scenarios for distributed generation in Europe. In *SUSTELNET project*.
- Torrens, P. M., & O'Sullivan, D. (2001). Cellular Automata and Urban Simulation: Where Do We Go from Here? *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28(2), 163–168. <https://doi.org/10.1068/b2802ed>
- Triantakonstantis, D. (2012). Urban Growth Prediction Modelling Using Fractals and Theory of Chaos. *Open Journal of Civil Engineering*, 2(2), 81–86. <https://doi.org/10.4236/OJCE.2012.22013>
- Triantakonstantis, D., & Mountrakis, G. (2012). Urban Growth Prediction: A Review of Computational Models and Human Perceptions. *Journal of Geographic Information System*, 04(06), 555–587. <https://doi.org/10.4236/jgis.2012.46060>
- Triantakonstantis, D., & Stathakis, D. (2015). Urban Growth Prediction in Athens, Greece, Using Artificial Neural Networks. *International Journal of Architectural and Environmental Engineering*, 9(3), 234–238. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.1099468>
- Tulla, A. F. (1983). El modelo de difusión de T. Hägestrand. Una aplicación a la ganadería del Pirineo Catalán. *Documents d'anàlisi Geogràfica*, 2, 069–160.
- Tuominen, A., Tapio, P., Varho, V., Järvi, T., & Banister, D. (2014). Pluralistic backcasting: Integrating multiple visions with policy packages for transport climate policy. *Futures*, 60, 41–58. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2014.04.014>
- UN-Habitat. (2009). *Planning Sustainable Cities. Global Report on Human Settlements*.
- Urgilez Clavijo, A., Gómez Delgado, M., & Barreira González, P. (2019). Análisis de Sensibilidad aplicado a modelos de crecimiento urbano basados en autómatas celulares de estructura irregular. *Cuadernos Geográficos*, 58(3), 326–348. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v58i3.7842>
- Valenzuela Montes, L. M., & Soria Lara, J. A. (2011). La incidencia de la planificación: propuesta de evaluación aplicada al desarrollo metropolitano. *Urban*, 81–104.
- Van Berkel, D. B., & Verburg, P. H. (2012). Combining exploratory scenarios and participatory backcasting: using an agent-based model in participatory policy design for a multi-functional landscape. *Landscape Ecology*, 27(5), 641–658. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9730-7>
- van Delden, H., & Hagen-Zanker, A. (2009). New Ways of Supporting Decision Making: Linking Qualitative Storylines with Quantitative Modelling. In S. Geertman & J. Stillwell (Eds.), *Planning Support Systems Best Practice and New Methods* (pp. 347–367). Springer.
- van Delden, H., & Vanhout, R. (2018). A Short Presentation of Metronamica. In *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios* (pp. 511–519). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60801-3_38
- van der Heijden, K. (2000). Scenarios and Forecasting. *Technological Forecasting and Social Change*, 65(1), 31–36. [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(99\)00121-3](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(99)00121-3)
- van der Heijden, K. (2005). *Scenarios The Art of Strategic Conversation* (2nd Edition). John Wiley & Sons.

- Vanderhaegen, S., & Canters, F. (2017). Mapping urban form and function at city block level using spatial metrics. *Landscape and Urban Planning*, *167*, 399–409. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.05.023>
- Verburg, P. H., Kok, K., Pontius, R. G., & Veldkamp, A. (2006). *Modeling Land-Use and Land-Cover Change*. 117–135. https://doi.org/10.1007/3-540-32202-7_5
- Verburg, P. H., van Eck, J. R. R., de Nijs, T. C. M., Dijst, M. J., & Schot, P. (2004). Determinants of Land-Use Change Patterns in the Netherlands. *Environment and Planning B: Planning and Design*, *31*(1), 125–150. <https://doi.org/10.1068/b307>
- Vergragt, P. J., & Quist, J. (2011). Backcasting for sustainability: Introduction to the special issue. *Technological Forecasting and Social Change*, *78*(5), 747–755. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2011.03.010>
- Vervoort, J. M., Kok, K., Beers, P.-J., Van Lammeren, R., & Janssen, R. (2012). Combining analytic and experiential communication in participatory scenario development. *Landscape and Urban Planning*, *107*(3), 203–213. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.06.011>
- Vizzari, M., & Sigura, M. (2013). Urban-rural gradient detection using multivariate spatial analysis and landscape metrics. *Journal of Agricultural Engineering*, *44*(s2). <https://doi.org/10.4081/JAE.2013.333>
- Volkery, A., Ribeiro, T., Henrichs, T., & Hoogeveen, Y. (2008). Your vision or my model? Lessons from participatory land use scenario development on a European scale. *Systemic Practice and Action Research*, *21*(6), 459–477. <https://doi.org/10.1007/S11213-008-9104-X>
- Von Bertalanffy, L., Braziller, G., & York, N. (1968). *General System Theory. Foundations, Development, Applications*.
- Walker, R. T. (2022). Geography, von thünen, and tobler’s first law: tracing the evolution of a concept. *Geographical Review*, *112*(4), 591–607. <https://doi.org/10.1080/00167428.2021.1906670>
- Walloth, C., Gebetsroither-Geringer, E., Atun, F., & Werner, L. C. (2016). *Understanding Complex Urban Systems* (C. Walloth, E. Gebetsroither-Geringer, F. Atun, & L. C. Werner, Eds.). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-30178-5>
- Walz, A., Lardelli, C., Behrendt, H., Grêt-Regamey, A., Lundström, C., Kytzia, S., & Bebi, P. (2007). Participatory scenario analysis for integrated regional modelling. *Landscape and Urban Planning*, *81*(1–2), 114–131. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2006.11.001>
- Weber, A. (1929). *Alfred Weber’s theory of the location of industries*. University of Chicago Press.
- Wegener, M. (2013). The future of mobility in cities: Challenges for urban modelling. *Transport Policy*, *29*, 275–282. <https://doi.org/10.1016/J.TRANPOL.2012.07.004>
- Wheeler, D., & Tiefelsdorf, M. (2005). Multicollinearity and correlation among local regression coefficients in geographically weighted regression. *Journal of Geographical Systems*, *7*(2), 161–187. <https://doi.org/10.1007/s10109-005-0155-6>
- White, R., & Engelen, G. (1993). Cellular Automata and Fractal Urban Form: A Cellular Modelling Approach to the Evolution of Urban Land-Use Patterns. *Environment and Planning A: Economy and Space*, *25*(8), 1175–1199. <https://doi.org/10.1068/a251175>

- White, R., & Engelen, G. (1997). Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(2), 235–246. <https://doi.org/10.1068/b240235>
- White, R., & Engelen, G. (2000). High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems. *Computers, Environment and Urban Systems*, 24, 383–400. www.elsevier.com/locate/compenvurbysys
- White, R., Engelen, G., & Uljee, I. (1997). The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(3), 323–343. <https://doi.org/10.1068/b240323>
- White, R., Engelen, G., Uljee, I., Lavalle, C., & Erlich, D. (1999). Developing an Urban Land Use Simulator for European Cities. *Proceedings of the 5th EC-GIS Workshop*.
- White, R., Straatman, B., & Engelen, G. (2004). Planning Scenario Visualization and Assessment: A Cellular Automata Based Integrated Spatial Decision Support System. In M. F. Goodchild & D. G. Janelle (Eds.), *Spatially integrated social science* (pp. 420–456). Oxford University Press.
- Wo, J. C. (2019). Mixed land use and neighborhood crime. *Social Science Research*, 78, 170–186. <https://doi.org/10.1016/j.ssresearch.2018.12.010>
- Wolfram, S. (1984). Cellular automata as models of complexity. *Nature. International Weekly Journal of Science*, 311(5985), 419–424. <https://doi.org/10.1145/253607.253649>
- Xia, C., Wang, H., Zhang, A., & Zhang, W. (2017). A high-performance cellular automata model for urban simulation based on vectorization and parallel computing technology. *International Journal of Geographical Information Science*, 32(2), 399–424. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/13658816.2017.1390118>
- Xu, C., Liu, M., Zhang, C., An, S., Yu, W., & Chen, J. M. (2007). The spatiotemporal dynamics of rapid urban growth in the Nanjing metropolitan region of China. *Landscape Ecology*, 22(6), 925–937. <https://doi.org/10.1007/S10980-007-9079-5>
- Xu, T., Gao, J., & Coco, G. (2019). Simulation of urban expansion via integrating artificial neural network with Markov chain – cellular automata. *International Journal of Geographical Information Science*, 33(10), 1960–1983. <https://doi.org/10.1080/13658816.2019.1600701>
- Yang, H., Fu, M., Wang, L., & Tang, F. (2021). Mixed Land Use Evaluation and Its Impact on Housing Prices in Beijing Based on Multi-Source Big Data. *Land*, 10(10), 1103. <https://doi.org/10.3390/land10101103>
- Yang, X., & Lo, C. P. (2003). Modelling urban growth and landscape changes in the Atlanta metropolitan area. *International Journal of Geographical Information Science*, 17(5), 463–488. <https://doi.org/10.1080/1365881031000086965>
- Yao, Y., Cheng, T., Sun, Z., Li, L., Chen, D., Chen, Z., Wei, J., & Guan, Q. (2022). VecLI: A framework for calculating vector landscape indices considering landscape fragmentation. *Environmental Modelling & Software*, 149, 105325. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOF.2022.105325>

- Yao, Y., Li, L., Liang, Z., Cheng, T., Sun, Z., Luo, P., Guan, Q., Zhai, Y., Kou, S., Cai, Y., Li, L., Ye, X., & Kong, H. (2021). *UrbanVCA: a vector-based cellular automata framework to simulate the urban land-use change at the land-parcel level*. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2103.08538>
- Yao, Y., Liu, X., Li, X., Liu, P., Hong, Y., Zhang, Y., & Mai, K. (2017). Simulating urban land-use changes at a large scale by integrating dynamic land parcel subdivision and vector-based cellular automata. *International Journal of Geographical Information Science*, 31(12), 2452–2479. <https://doi.org/10.1080/13658816.2017.1360494>
- Yigitcanlar, Wilson, & Kamruzzaman. (2019). Disruptive Impacts of Automated Driving Systems on the Built Environment and Land Use: An Urban Planner's Perspective. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 5(2), 24. <https://doi.org/10.3390/joitmc5020024>
- Yoshimura, Y., Kumakoshi, Y., Milardo, S., Santi, P., Arias, J. M., Koizumi, H., & Ratti, C. (2021). Revisiting Jane Jacobs: Quantifying urban diversity. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 0(0), 239980832110509. <https://doi.org/10.1177/23998083211050935>
- Yu, M., Huang, Y., Cheng, X., & Tian, J. (2019). An ArcMap plug-in for calculating landscape metrics of vector data. *Ecological Informatics*, 50, 207–219. <https://doi.org/10.1016/J.ECOINF.2019.02.004>
- Zapata, M. A., & Kaza, N. (2015). Radical uncertainty: scenario planning for futures. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 42(4), 754–770. <https://doi.org/10.1068/b39059>
- Zaragozí, B., Belda, A., Linares, J., Martínez-Pérez, J. E., Navarro, J. T., & Esparza, J. (2012). A free and open source programming library for landscape metrics calculations. *Environmental Modelling & Software*, 31, 131–140. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2011.10.009>
- Zhai, Y., Yao, Y., Guan, Q., Liang, X., Li, X., & Pan, Y. (2020). Simulating urban land use change by integrating a convolutional neural network with vector-based cellular automata. *International Journal of Geographical Information Science*, 34(7), 1475–1499. <https://doi.org/10.1080/13658816.2020.1711915>
- Zhou, G., Li, C., Li, M., Zhang, J., & Liu, Y. (2016). Agglomeration and diffusion of urban functions: An approach based on urban land use conversion. *Habitat International*, 56, 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2016.04.002>
- Zhou, L., Dang, X., Sun, Q., & Wang, S. (2020). Multi-scenario simulation of urban land change in Shanghai by random forest and CA-Markov model. *Sustainable Cities and Society*, 55, 102045. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102045>
- Zoido Naranjo, F., Vega, S., Morales, G., & Lois, R. C. (2000). *Diccionario de geografía urbana, urbanismo y ordenación del territorio (1a. ed.)*. Editorial Ariel. <http://up-rid2.up.ac.pa:8080/xmlui/handle/123456789/1820>



Universidad
de Alcalá