



Modelización espacial prospectiva del crecimiento urbano y cambios de usos de la tierra en la cuenca del río Luján (2010-2030)

Prospective spatial modeling of urban growth and land use changes in the Luján River basin (2010-2030)

Luis Humacata 

Universidad Nacional de Luján (UNLu). Luján – provincia de Buenos Aires. Argentina

luishumacata@hotmail.com

Recibido: 22/04/2026

Aceptado: 22/06/2026

RESUMEN

El presente trabajo se enfoca en desarrollar un modelo para la predicción del crecimiento urbano y cambios de usos de la tierra basado en cadenas de Markov, Evaluación Multicriterio y Autómatas Celulares con Sistemas de Información Geográfica, en el área de la cuenca del río Luján (Buenos Aires, Argentina), en el periodo 2010-2030. A partir de dicha propuesta metodológica se han utilizado variables socioeconómicas y ambientales para definir los potenciales de transición y se obtuvo como resultado el modelo espacial prospectivo que predice la configuración urbana y de usos del suelo hacia el año 2030, siendo una herramienta fundamental para la toma de decisiones en materia de planificación territorial a escala urbano-regional.

Palabras clave: Modelización prospectiva; Crecimiento urbano; Sistemas de Información Geográfica; Cuenca del río Luján.

ABSTRACT

This work focuses on developing a model for predicting urban growth and land use changes based on Markov chains, Multicriteria Evaluation, and Cellular Automata with Geographic Information Systems, in the Luján River basin area (Buenos Aires, Argentina), during the period 2010-2030. Based on this methodological approach, socioeconomic and environmental variables were used to define transition potentials, resulting in a prospective spatial model that predicts urban and land use configurations by 2030. This model is a fundamental tool for decision-making in urban-regional territorial planning.

Keywords: Prospective modeling; Urban growth; Geographic Information Systems; Luján River Basin.

1. Introducción

La expansión continua de las áreas urbanas es una problemática de escala mundial, que se agrava en las ciudades de América Latina por su alto índice de urbanización (Giglio y Mancuello, 2020). Según el reporte de la Organización de Naciones Unidas [ONU] 'Ciudades del mundo 2020', se estima que para el 2030 un 60,4 % de la población mundial vivirá en ciudades. Además, se prevé que el 90% de la expansión urbana se producirá en los países en desarrollo (ONU-Hábitat, 2020), siendo Argentina, uno de los países latinoamericanos que se destaca por su acelerado proceso de urbanización, principalmente en aquellas ciudades de tamaño intermedio

(Vapñarsky y Gorojovsky, 1990; Manzano y Velázquez, 2015).

La estructura socio-territorial de las áreas metropolitanas presenta una configuración espacial diferenciada a partir de la componente urbana, cuya densidad disminuye desde la ciudad central hacia los sectores más periféricos. Tradicionalmente, el proceso de expansión de la aglomeración urbana ha seguido un patrón de crecimiento en forma de anillos concéntricos y sectores, asociados a la red de transportes. El actual proceso de urbanización, bajo el modelo de crecimiento urbano disperso o *urban sprawl* (Arellano y Roca, 2010), se caracteriza por la proliferación de urbanizaciones cerradas de baja densidad poblacional, con altos niveles de accesibilidad a partir de la red de autopistas metropolitanas. Este crecimiento acelerado de la urbanización, está produciendo conflictos por la competencia espacial entre coberturas terrestres en espacios que forman parte de la franja urbano-rural, generando la fragmentación del territorio, la pérdida de usos de la tierra que sustentan actividades socioeconómicas tradicionales y el impacto ambiental adverso en cuanto a la disminución de los servicios ambientales (Matteucci et al., 2006).

El análisis y la modelización espacial de los cambios de usos y coberturas terrestres genera resultados de suma utilidad para la toma de decisiones en materia de planificación territorial. En este sentido, resulta necesario comprender los cambios desde una perspectiva histórica, es decir, evaluar cómo ha sido la dinámica de la ocupación del suelo en periodos anteriores, detectando las categorías que han presentado los mayores incrementos y de cómo ha sido su incidencia en el ritmo de cambio de otros usos de la tierra. El análisis centrado en la expansión urbana, radica en que es un fenómeno que genera los mayores impactos en los espacios a hacia los cuales se dirige, teniendo consecuencias sobre actividades agropecuarias y coberturas ambientales. Es por ello, que el presente trabajo tiene como objetivo desarrollar un modelo para la predicción del crecimiento urbano y cambios de usos de la tierra basado en cadenas de Markov, Evaluación Multicriterio y Automatas Celulares con Sistemas de Información Geográfica, en el área de la cuenca del río Luján (Buenos Aires, Argentina), en el periodo 2010-2030, siendo una herramienta fundamental para la toma de decisiones en materia de planificación territorial a escala urbano-regional.

2. Antecedentes y marco conceptual

La Geografía se presenta como la disciplina con mayor potencial para el estudio de los patrones de distribución espacio-temporal a través de su postura cuantitativa y racionalista, la cual permite realizar aportes orientados en los conceptos de localización, distribución espacial, asociación espacial, interacción espacial y evolución espacial. La metodología de análisis espacial apoyado en el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), en el marco de la Geografía Aplicada, se orienta en la búsqueda de generalidades y regularidades en el comportamiento espacial y permite llegar a modelizaciones con la finalidad de explicar y predecir patrones espaciales (Buzai y Baxendale, 2013). El enfoque temporal, desde el análisis espacial cuantitativo (Buzai, 2010), pretende captar las variaciones de las distribuciones espaciales en el tiempo. En este sentido, se han realizado interesantes avances orientados al análisis y modelización espacio-temporal (Aguilera Ontiveros, 2002; Batty, 2005; Buzai y Baxendale, 2011), entre los cuales podemos mencionar aquellos enfocados en la dinámica urbana y modelos de cambios de usos del suelo a diferentes escalas espaciales. De esta manera, se puede proceder a partir de un análisis histórico y prospectivo. En el primer caso, se busca conocer la evolución pasada de las configuraciones espaciales actuales. Para ello, se ha propuesto la metodología de detección de cambios (Pontius et al., 2004), cuya aplicación se encuentra en numerosos trabajos de investigación a nivel nacional e internacional que han obtenido interesantes resultados (Martínez Vega et al., 2008; Plata Rocha et al., 2009; Ramírez y Pértile, 2013; Lara, 2014; Humacata, 2018; Cardozo et al., 2021).

El diagnóstico territorial de la situación pasada y presente, nos permite avanzar hacia la generación de escenarios a futuro, considerando a la Geografía como una ciencia prospectiva. En este sentido, el avance hacia la modelización espacial prospectiva permite determinar cuáles son los sitios más aptos para el crecimiento urbano, es decir, aquellos sitios que minimizan el conflicto entre usos del suelo (Malczewski, 1999; Gómez Del-

gado y Barredo Cano, 2006; Príncipi, 2016), donde es posible que la ciudad se expanda sin comprometer el desarrollo de espacios productivos y ecosistemas naturales (Xie y Sun, 2000; Aguilera Benavente et al., 2009; Gómez Delgado y Rodríguez Espinosa, 2012; Linares, 2015; Salazar Proaño, 2020; Gómez, 2021). De esta manera, se plasma uno de los objetivos principales de la Geografía con carácter aplicado, para lograr un desarrollo territorial sostenible en el marco del ordenamiento territorial a escala urbano-regional.

La mayor capacidad de la modelización espacial prospectiva, dirigida a determinar los cambios de usos del suelo futuro, consiste en obtener una proyección del comportamiento espacial de todas las categorías, incluyendo factores antrópicos y ambientales, que son los que van a direccionar el cambio futuro. Es por ello, que los modelos prospectivos intentan modelar una realidad sumamente compleja, donde se dan procesos de cambios a partir de diversas causas, tales como los aspectos económicos, poblacionales, del entorno natural, y normativos, entre otros, que de alguna manera influyen en la dinámica de ocupación regional.

Si bien las propuestas orientadas a la modelización espacial prospectiva vienen de hace décadas atrás, éstas han tenido un gran desarrollo en los últimos años, a partir de su integración con los Sistemas de Información Geográfica (SIG). En este sentido, surgen propuestas basadas en modelos matemáticos y estadísticos, u otros como los autómatas celulares, redes neuronales, cadenas de markov, modelado basado en agentes, entre otros, que pueden aplicarse individualmente o a partir de una combinación, lo cual resulta, en este caso, en un enfoque basado en modelos híbridos.

A partir de estas consideraciones, la presente investigación se enfocará en desarrollar un modelo híbrido para la predicción del crecimiento urbano y cambios de usos y coberturas terrestres basado en cadenas de markov, evaluación multicriterio y autómatas celulares. De esta manera, se complementa el análisis multitemporal con el análisis multivariable para la generación de una modelización espacial que tenga en cuenta la dinámica real de la ocupación de la superficie terrestre (Paegelow et al., 2003).

3. El área de estudio

El área de estudio corresponde a la cuenca hidrográfica del río Luján, ubicada al noreste de la provincia de Buenos Aires (Figura 1). El río Luján es el curso principal y el que le da nombre a la cuenca hidrográfica, con un recorrido de 157 km desde su nacimiento hasta su desembocadura en el río de la Plata. La cuenca tiene una superficie de 3.762 km² y se posiciona como la de mayor superficie en la Región Metropolitana de Buenos Aires, ocupando el 14 % del total de la región.

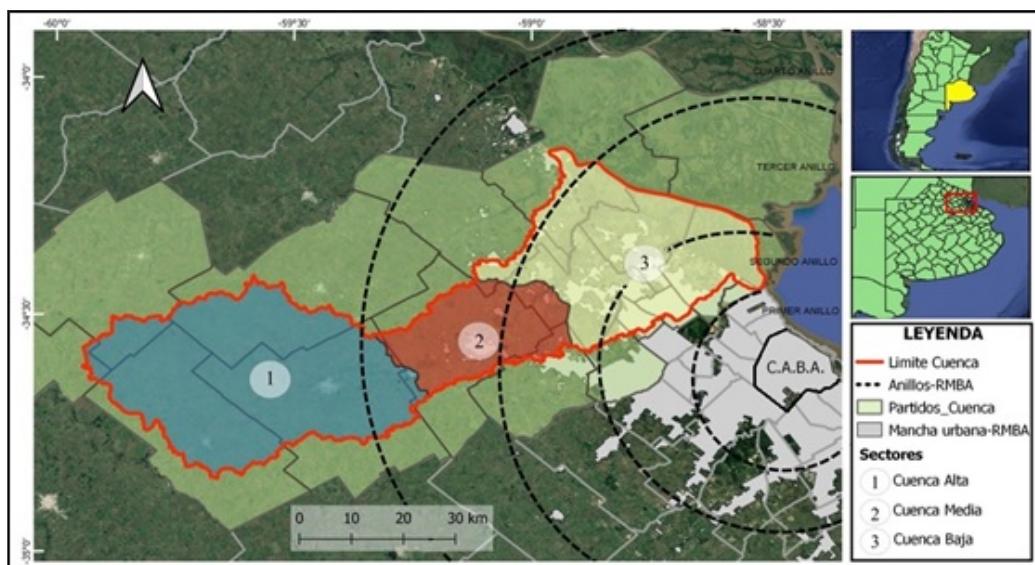


Figura 1. Cuenca del río Luján (Provincia de Buenos Aires, Argentina).

Fuente: Elaboración propia.

El área de estudio se divide en tres sectores ([Instituto Nacional del Agua \[INA\], 2007](#)): cuenca alta, cuenca media y cuenca baja, abarcando de forma parcial dieciséis municipios ([Buzai y Lanzelotti, 2019](#)), y cuenta con una población total de 1.925.072 ([Instituto Nacional de Estadísticas y Censos \[INDEC\], 2026](#)). Presenta una gran diversidad de coberturas y usos de la tierra, bajo un esquema de organización espacial que configura un gradiente urbano-rural, en dirección este-oeste, desde los municipios que forman parte del segundo anillo de la Región Metropolitana de Buenos Aires e integran la mancha urbana del Gran Buenos Aires, con altos niveles de densidad poblacional y ocupación, disminuyendo a medida que aumenta la distancia a la ciudad de Buenos Aires, como centro urbano de mayor densidad, extendiéndose hacia los municipios que forman parte de la franja urbano-rural, en el tercer y cuarto anillo, que presentan una mayor heterogeneidad de usos de la tierra, hasta el sector de la cuenca alta, sujeto a la dinámica rural, donde la actividad agropecuaria ocupa la mayor superficie.

4. Metodología de modelización espacial prospectiva

La propuesta metodológica de modelización espacial prospectiva se ha organizado a partir de las siguientes cuatro fases:

4.1. Cadenas de Markov

El modelo de cadenas de Markov se basa en considerar que el estado futuro de un sistema puede llegar a simularse teniendo en cuenta el estado inmediatamente anterior. Es decir, la distribución espacial de usos en el tiempo t es el resultado de la situación en un momento anterior, definido por $t-1$. Es así como dicho modelo se basa en que la probabilidad de que ocurra un evento se encuentra íntimamente relacionada a las características de dicho evento, pero en un estado anterior ([Buzai y Baxendale, 2011](#)).

El modelo parte de esta consideración para describir el cambio de uso de un periodo a otro y posteriormente lo aplica para la proyección de cambios futuros. Se procede metodológicamente a partir de la superposición y comparación de dos capas temáticas en dos cortes temporales; a partir de dicho procedimiento se estima una matriz de probabilidad de transición para cada localización hacia cada categoría, y una matriz de probabilidades de cambio.

Los pasos metodológicos para la aplicación del modelo de cadenas de Markov son los siguientes ([Sang et al., 2011](#)):

El proceso de conversión de un estado en otro estado de un sistema se denomina transición de estado. Si se considera que P es la probabilidad de transición de un estado actual en otro estado en el siguiente corte temporal, la fórmula es la siguiente:

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{m1} & P_{m2} & \dots & P_{mm} \end{bmatrix}$$

Donde P representa la probabilidad del estado i al estado j .

Dicha ecuación debe cumplir con las siguientes condiciones:

$$\sum_{j=1}^n P_{ij} = 1,$$

$$0 \leq P_{ij} \leq 1.$$

En este sentido, resulta necesario la obtención de la matriz de probabilidades de transición y de probabilidades de cambio, a partir de las cuales el modelo predictivo de Markov quedaría definido de la siguiente manera:

$$P_{(n)} = P_{(n-1)}, P_{ij} = P_{(0)}P_{ij}^n,$$

donde P_n representa la probabilidad de estado de cualquier momento y $P(0)$ representa la matriz primaria.

Los resultados de la predicción resultan en una colección de mapas de categorías de coberturas y usos, cuyos píxeles contienen la probabilidad de pertenecer a determinada categoría (Paegelow et al., 2003). Como hemos señalado, se generan dos matrices, una con la probabilidad de transición entre todas las categorías, y otra de áreas de transición, que indica la cantidad de píxeles que son candidatos a transitar hacia otra categoría.

Resulta necesario puntualizar que el modelo de Markov se basa exclusivamente en el análisis de los cambios internos de las categorías de ocupación, por lo que no considera la incorporación de otro tipo de variables, con alto componente explicativo y descriptivo. Por tal motivo, la propuesta metodológica de la presente investigación, se apoya en los antecedentes en la temática, que indican la incorporación complementaria de las técnicas de evaluación multicriterio, para la definición de los potenciales de transición, a partir de mapas de aptitud al cambio de uso de cada categoría. Este punto se desarrolla en el siguiente apartado.

4.2. Análisis de Evaluación Multicriterio

Las técnicas de evaluación multicriterio han tenido un gran desarrollo dentro de lo que se denomina modelado cartográfico basado en el uso de los SIG. En este sentido, cabe mencionar algunas obras clásicas que han sistematizado esta metodología de vital importancia para la ciencia geográfica, tales como Tomlin (1990), Eastman et al. (1993), DeMers (2002), Gómez Delgado y Barredo Cano (2006), y en nuestro país, la obra de Buzai y Baxendale (2011), que presenta la mayor sistematización metodológica que vincula las técnicas de análisis espacial cuantitativo y los SIG.

La finalidad de esta metodología radica en la búsqueda de resultados de sitios de aptitud locacional para el desarrollo de determinados usos, lo cual da cuenta de su capacidad como herramienta para la generación de propuestas socioespaciales en apoyo a la toma de decisiones en el marco de la planificación territorial.

Los procedimientos técnicos de la evaluación multicriterio requieren de información espacial en formato de capas temáticas o layers, que son los criterios que se consideran para la definición de sitios óptimos. Estos criterios pueden ser de dos tipos: los factores, es decir, son aquellos que presentan valores de aptitud continua en cada variable; y las restricciones, que son las capas temáticas que tienen como objetivo limitar los resultados en un sector específico. En resumen, los procedimientos de esta metodología se inician con la selección de las variables de interés, que se presentan en formato de capas temáticas, a partir de las cuales se avanza hacia la generación de factores y restricciones. El método continúa en base a procedimientos de estandarización de variables y la combinación para la generación de resultados.

Existen diversas alternativas para la aplicación de las técnicas de evaluación multicriterio. Si el objetivo es determinar el sitio más apto para una actividad o uso, se está dentro de una evaluación uniobjetivo, y para su resolución se pueden aplicar procedimientos técnicos booleanos, así como de combinación lineal ponderada, entre otros. Pero en muchas ocasiones se presenta la necesidad de generar alternativas para la localización de dos o más actividades, que pueden ser complementarias, es decir, cuando una misma localización es apta para uno u otro objetivo, o conflictivas, en este caso se considera que una localización solo es apta para uno de los dos usos. Estos procedimientos hacen referencia a la modalidad de evaluación multiobjetivo (Buzai y Baxendale, 2011).

A continuación, se presentan los principales procedimientos técnicos para la aplicación del método de combinación lineal ponderada, cuyo objetivo es generar mapas de aptitud espacial de cada categoría al cambio.

a) Selección de criterios:

Se determinan los criterios a considerar, ya sean factores (con valores de aptitud continua) o restricciones (capas de limitantes de aptitud). En este punto se procede a la creación de las capas temáticas que serán consideradas para la obtención del mapa de aptitud de cada uno de los usos. En este sentido, se genera una base de datos geográfica tendiente a la representación espacial de diversos temas de interés. La misma se realiza en el entorno de los SIG, donde además se precisan aspectos técnicos vinculados a la elaboración de cartografía temática, tales como procedimientos de digitalización de la base gráfica, base de datos alfanumérica, extensión del área de estudio, sistema de proyección y unidad mínima de resolución espacial.

b) Estandarización de factores:

La estandarización de variables se puede realizar desde dos perspectivas. La estandarización a partir de la lógica booleana, considera trabajar solamente con mapas de restricciones, los cuales cuentan con dos categorías: 0=áreas sin aptitud y 1=áreas con aptitud. Cada uno de los factores booleanos cuenta con la misma importancia respecto de la problemática total. Se procede a partir de correspondencias espaciales en los valores de cada una de las localizaciones con el objetivo de obtener la mayor aptitud para cada categoría.

La otra perspectiva implica realizar una estandarización continua en las categorías de los factores. En este sentido, la lógica fuzzy permite la obtención de mapas de aptitud continua para cada factor, es decir, que la diferencia estaría dada porque las zonas de aptitud no tienen la misma aptitud en todas las localizaciones intervinientes, sino que ellas variarán de manera continua en su interior. Los procedimientos técnicos se sintetizan en la realización de cálculos de distancia con funciones de crecimiento o decrecimiento, las cuales pueden ser lineales, exponenciales o sigmoideas. Para la definición de los factores en estandarización fuzzy, se debe apoyar en la teoría y antecedentes sobre el comportamiento de las variables.

c) Ponderación de factores:

La importancia relativa de cada factor en la definición del mapa de aptitud para cada uso, se realiza a partir del método de ponderación por ranking recíproco. Este método se basa en la consideración de expertos en cada temática para el establecimiento de los parámetros de importancia. Se aplica a partir de la siguiente fórmula:

$$w_j = \frac{1/r_j}{\sum (\frac{1}{r_j})}$$

Donde w_j es el valor de ponderación otorgado a cada factor y r_j el número de orden en el ranking de acuerdo a los valores de importancia. Las propiedades de este método indican que los valores van de 0 a 1, y cuya sumatoria es de 1.

d) Combinación lineal ponderada:

En este punto, la metodología de evaluación multicriterio se basa en la aplicación del método de combinación lineal ponderada, que consiste en la correspondencia espacial entre los factores con la inclusión de los valores de ponderación. El resultado se refiere a un valor resumen para cada mapa de aptitud, es decir, que cada localización asume un valor de aptitud (I). Estos procedimientos se realizan según la siguiente fórmula:

$$I_i = (f_1 \times p_1) + (f_2 \times p_2) + (f_3 \times p_3) + \dots + (f_n \times p_n)$$

$$I_i = \sum f_i p_i$$

Donde I_i es el valor índice para cada unidad espacial i , Σ es la sumatoria de los resultados totales de las capas temáticas, p son los valores de ponderación de cada factor.

En este momento es posible la integración de capas de limitantes a partir de procedimientos matemáticos de multiplicación de capas booleanas. En este sentido, la ampliación de la fórmula sería la siguiente:

$$I_i = \sum_{j=1}^n f_j p_j \prod r_j$$

En síntesis, la secuencia metodológica de la técnica de evaluación multicriterio inicia con la definición de capas temáticas, su estandarización fuzzy, el establecimiento de valores de importancia, y la integración de restricciones para su imposición por multiplicación.

4.3. Autómatas celulares

La técnica de modelado espacial basado en autómatas celulares ha sido una de las más utilizadas cuando se pretende predecir los patrones espaciales de expansión urbana y cambios de usos. Se encuentra dentro del grupo de los modelos heurísticos, es decir, que pretende generar simulaciones de procesos no lineales, enfocado en los cambios de las estructuras espaciales como sistemas dinámicos complejos.

El desarrollo de modelos prospectivos a partir de autómatas celulares [AC], ha tenido una gran aplicación en diversas temáticas en las últimas décadas a partir de su integración con los SIG de base raster, aunque cabe mencionar que no es una técnica nueva, sino que tiene varias décadas de desarrollo. Se inician en los años cuarenta del siglo pasado, como modelos matemáticos desarrollados por John Von Neumann y Stanislaw Ulam, alcanzando una gran popularidad a partir de la obra de [Conway \(1970\)](#): el 'juego de la vida', donde presenta de forma sencilla el funcionamiento de los AC. Desde la disciplina geográfica, podemos señalar la obra '*Cellular-Geography*' de [Tobler \(1979\)](#), siendo el primer antecedente del uso de los AC en temáticas urbanas, aunque es a partir de la década de 1990, donde se han dado los principales aportes para el modelado de procesos urbanos complejos ([White y Engelen, 1993](#); [White et al., 1997](#)). Otros antecedentes se encuentran en [Clarke et al. \(1997\)](#), [Xie y Sun \(2000\)](#), [Aguilera Ontiveros \(2002\)](#) y [Polidori \(2004\)](#).

En este sentido, su aplicación al análisis y modelización de procesos espaciales permite definir a un AC:

...como un conjunto de objetos situados sobre una región geográfica o asociados a puntos en el espacio susceptibles de adquirir ciertos estados según transcurre el tiempo, siempre en forma discreta o de saltos. Estos objetos cambian sus estados en función de sus propios estados previos y de los de aquellos otros entes o individuos situados en su vecindad. ([Linares, 2015](#), p.235)

Su gran capacidad radica en que genera modelizaciones que presentan patrones de auto-organización espacial de los sistemas complejos a partir de comportamientos locales ([Buzai y Baxendale, 2011](#)).

Los modelos de simulación de crecimiento urbano basados en AC consideran los siguientes elementos ([Aguilera Benavente et al., 2012](#)):

a) Estructura de base raster: su capacidad de integración con un SIG, permite disponer de un modelo de representación de la estructura espacial para la existencia de los autómatas, es decir, que cada celda o píxel de la matriz raster formada por $n \times m$ celdas de área de estudio, contendrá a un autómata.

b) Conjunto finito de estados: hace referencia a la pertenencia de cada autómata a un determinado estado, dentro del conjunto de las categorías de usos.

c) Definición de vecindad: en esta instancia se decide el alcance espacial de la influencia de cada autó-

mata, es decir, el conjunto de celdas que tendrán incidencia en la definición de pertenencia de las categorías de usos. La Figura 2, presenta las medidas de vecindad de Von Neumann y de Moore. A partir del tipo de vecindad, la celda central tendrá un valor 1 (activo) o 0 (inactivo).

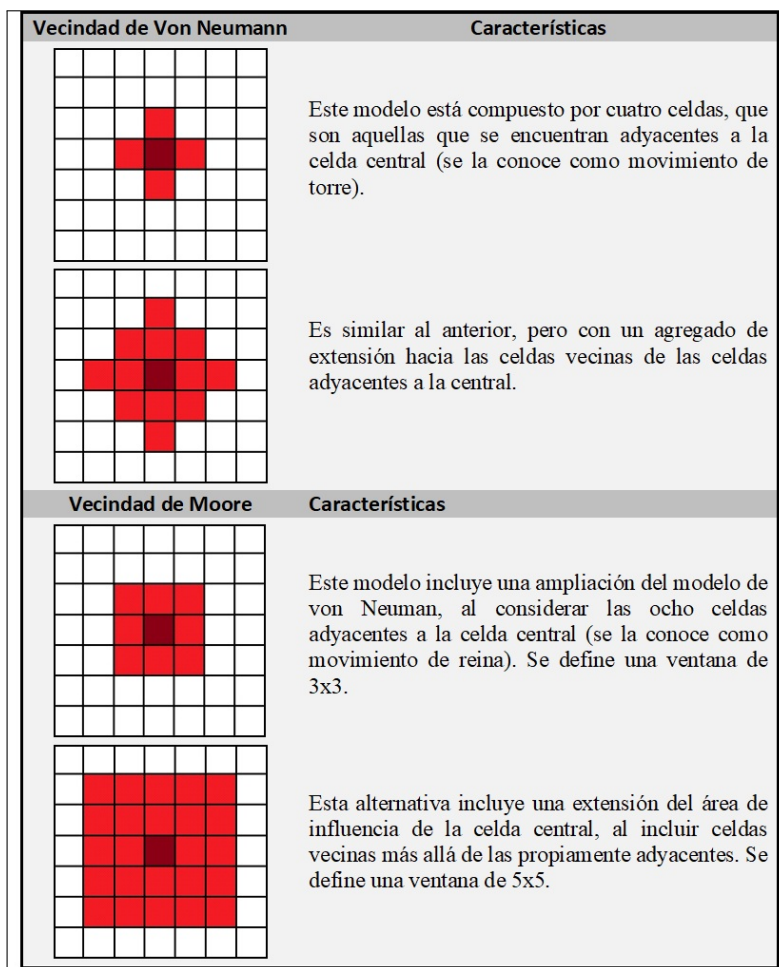


Figura 2. Medidas de vecindad de Von Neumann y de Moore.

Fuente: Elaboración propia.

d) Conjunto de reglas de transición: hace referencia al criterio adoptado para determinar el cambio de estado de un autómata, teniendo en cuenta su estado inicial y el estado de las celdas vecinas. En este sentido, un cambio de estado se dará a partir de los valores de aptitud para la transición a otra categoría.

e) Secuencia de tiempos: corresponde a las iteraciones de la regla de transición para cada autómata, donde se define si su estado se mantiene o cambia a través del tiempo.

La fórmula del modelo de AC es la siguiente:

$$S(t, t + 1) = f(S(t), N)$$

Donde S es el conjunto de estados celulares limitados y discretos, N es el campo celular, t y t + 1 indican los diferentes tiempos, y f es la regla de transformación de los estados celulares en el espacio local.

Para la presente investigación, se ha seleccionado el método CA–Markov, que se encuentra integrado en el software IDRISI. Este método genera un resultado de predicción de cambios de usos a partir de combinar la técnica de los Autómatas celulares, Cadenas de Markov y Evaluación multicriterio/multiobjetivo (MOLA). La potencialidad de esta propuesta desde el ámbito del análisis espacial, radica en que ofrece tanto la inclusión del factor de contigüidad espacial y la probabilidad de la distribución espacial de las transiciones según cadena de

Markov, lo cual lo convierte en un modelo predictivo de alta capacidad para modelar la dinámica de fenómenos complejos.

4.4. Calibración y validación del modelo

La fase de calibración y validación resulta de suma importancia al momento de evaluar la capacidad de predicción del modelo de cambios de usos de la tierra, es decir, cuando se pretende medir el grado de ajuste del modelo comparado con la realidad. Para ello, se procede a considerar el comportamiento de los cambios en un periodo conocido, y utilizar los parámetros resultantes como prueba para la validación de la proyección futura.

Al considerar que no es posible evaluar el mapa proyecto a futuro con la realidad, se procede a corroborar la veracidad del modelo a partir de disponer de dos mapas de usos de la tierra de dos cortes temporales diferentes al modelo proyectado inicialmente y a partir de allí generar una predicción futura, cuyo resultado pueda ser contrastado con la realidad.

El análisis comparativo entre el modelo proyectado y el mapa real, se realiza a partir del índice Kappa de correspondencia. Este índice brinda medidas cuantitativas de la precisión proporcional o exactitud entre los resultados proyectados por el modelo y aquellos que se dan en la realidad¹.

Se procede a partir de la tabulación cruzada para comparar la correspondencia espacial entre ambas capas temáticas, a partir de la cual se realizan los cálculos de porcentajes de coincidencias y el índice kappa. El primero se calcula como la sumatoria de la diagonal de la matriz de tabulación cruzada dividido por el conteo total de píxeles multiplicado por cien. Este procedimiento se realiza a partir de la siguiente fórmula:

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^r x_{ii}}{n} \times 100$$

Donde PC es el porcentaje de correspondencia, x_{ii} son los valores de la diagonal de la matriz, r es la cantidad de filas y n la cantidad de píxeles.

Apoyado en los resultados del cruce tabular, el índice Kappa se calcula de la siguiente forma:

$$K = \frac{P(A) - P(E)}{1 - P(E)}$$

Donde $P(A)$ representa la coincidencia de píxeles entre ambos mapas y $P(E)$ representa la proporción de acuerdo esperado sobre la distribución observada.

Los valores arrojados por este índice varían entre -1 y 1. El valor extremo negativo indica una correlación en sentido inverso, y, por el contrario, un valor de 1, indica una correlación positiva perfecta. La ausencia de correlación se dará en valores próximos a 0. Valores superiores a 0,75 se consideran como parámetro de una buena correlación.

5. Aplicación y resultados

A continuación, se presenta el esquema metodológico (Figura 3) que sintetiza los principales procedimientos implicados en el proceso de modelización espacial tendiendo a la generación de configuraciones espaciales futuras.

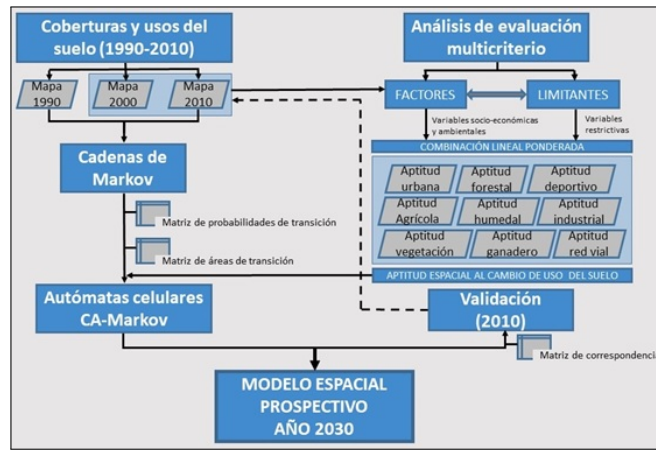


Figura 3. Esquema metodológico de la modelización espacial prospectiva.

Fuente: Elaboración propia.

5.1. Cadenas de Markov

El modelo de cadenas de Markov calcula la probabilidad de que ocurra un evento a partir de su comportamiento en un periodo anterior. Es decir, que se parte de este conocimiento previo y posteriormente se lo aplica para la proyección de cambios futuros. Como hemos señalado en el apartado metodológico, el modelo se basa en la superposición y comparación cartográfica de dos mapas, y procede a estimar una matriz de probabilidad de transición y una matriz de probabilidades de cambio. A partir del módulo de cadena de Markov en el software TerrSet, se generan las mencionadas matrices de probabilidades y de áreas de transición. Dichos resultados se presentan en la [Tabla 1](#) y la [Tabla 2](#), respectivamente.

Tabla 1. Matriz de probabilidades de transición entre categorías

	Cl. 1	Cl. 2	Cl. 3	Cl. 4	Cl. 5	Cl. 6	Cl. 7	Cl. 8	Cl. 9	Cl. 10	Cl. 11	Cl. 12
1	84.99	0.42	0.83	0.00	0.00	13.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	15.02	84.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	7.75	7.42	84.67	0.00	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	1.36	1.36	1.36	85.00	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36
5	1.36	1.36	1.36	1.36	85.00	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36
6	4.17	8.22	1.27	0.43	1.93	79.57	1.26	1.59	0.27	1.28	0.01	0.00
7	7.90	4.21	0.31	0.00	0.00	32.98	41.97	0.06	0.00	12.57	0.00	0.00
8	0.00	0.16	0.01	0.00	0.00	50.03	0.50	48.50	0.10	0.57	0.12	0.00
9	0.68	9.22	0.12	0.03	0.00	10.13	0.00	0.27	65.85	13.35	0.35	0.00
10	5.03	12.65	2.39	0.14	0.10	15.96	0.19	5.58	0.97	56.48	0.52	0.00
11	0.00	17.12	0.32	0.00	0.00	12.24	0.00	9.58	0.00	24.10	36.64	0.00
12	0.00	0.00	0.00	12.87	0.00	2.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	84.98

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Matriz de áreas de transición entre categorías.

	Cl. 1	Cl. 2	Cl. 3	Cl. 4	Cl. 5	Cl. 6	Cl. 7	Cl. 8	Cl. 9	Cl. 10	Cl. 11	Cl. 12
1	29733	146	292	0	0	4813	0	0	0	0	0	0
2	2689	15210	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	293	281	3206	0	0	6	0	0	0	0	0	0
4	85	85	85	5283	85	85	85	85	85	85	85	85
5	21	21	21	21	1310	21	21	21	21	21	21	21
6	9138	18041	2786	952	4229	174560	2756	3498	584	2809	22	0
7	247	132	10	0	0	1032	1313	2	0	393	0	0
8	1	38	1	0	0	11605	116	11250	24	132	28	0
9	112	1522	20	6	1	1674	0	44	10874	2204	57	0
10	1630	4093	772	46	32	5166	62	1806	313	18280	167	0
11	0	1351	25	0	0	967	0	756	0	1903	2893	0
12	0	0	0	1210	0	202	0	0	0	0	0	7986

Fuente: Elaboración propia

A partir de dichos procedimientos se puede avanzar hacia el análisis de las probabilidades de transición (Figura 4). Se observa, en términos generales, que las probabilidades de cambio se dan hacia los usos urbanos y agropecuarios, siendo las coberturas naturales aquellas que presentan las mayores probabilidades de transición al uso urbano disperso y agrícola.

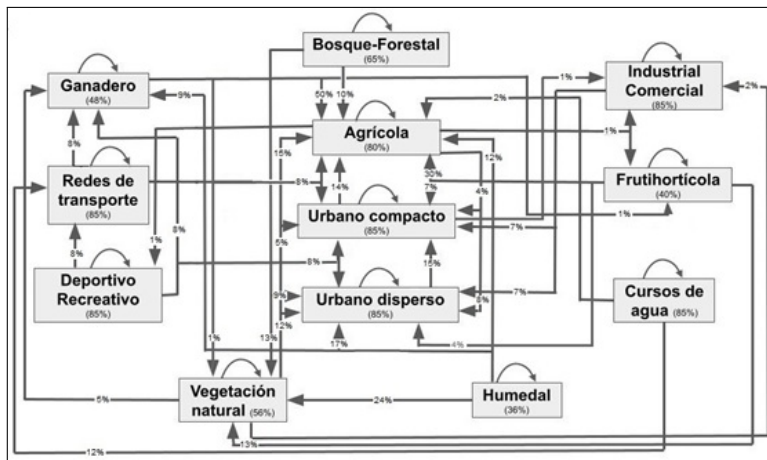


Figura 4. Probabilidades de transición².

Fuente: Elaboración propia.

5.2. Análisis de evaluación multicriterio

En el presente apartado se realizará la aplicación de la metodología de evaluación multicriterio para la determinación de los mapas de aptitud al cambio de uso de cada categoría. Dicha metodología, inicia con la definición de criterios, integrando aquellos denominados factores junto a las capas temáticas de restricciones. Se avanza hacia la estandarización de los factores a partir del método fuzzy y el establecimiento de valores de ponderación, asignando valores de importancia relativa o peso en la definición de los niveles de aptitud. Finalmente, se aplica el método de combinación lineal ponderada, para generar un mapa síntesis para cada categoría. Los resultados cartográficos serán considerados los insumos básicos para la posterior aplicación de los procedimientos de modelización prospectiva.

Aptitud urbano compacto:

La aptitud para la expansión urbana ha sido calculada con 3 capas temáticas a partir de los siguientes criterios:

Factores:

Distancia a áreas urbanas actuales (Año 2010):

Se considerarán las áreas urbanas en su modalidad compacta. Tendrán mayor aptitud para el desarrollo urbano las áreas cercanas a la misma, considerando los 2.000 metros como la distancia más propicia para la expansión urbana a partir de la cual va decreciendo la aptitud hasta llegar a los 6.000 metros.

Se reclasificaron las áreas urbanas. Se realizó el cálculo de distancias y estandarización fuzzy lineal decreciente (255-0 de 2.000 a 6.000 metros).

Resultado-Factor 1: Aptitud de distancia a la aglomeración.

Distancia a redes de transporte:

Este criterio considera que las áreas más óptimas para el desarrollo urbano son aquellas que se encuentran cercanas a la red de transporte, siendo los 3.000 metros considerados como la distancia óptima partir de la cual va decreciendo la aptitud.

Se reclasificaron las vías de transporte. Se realizó el cálculo de distancias y estandarización fuzzy lineal decreciente (255-0 de 2.000 a 4.000 metros).

Resultado-Factor 2: Aptitud de distancia a red de transporte.

Categorías más propensas a cambiar a urbano:

Se considera la susceptibilidad de cada categoría de cambiar a la cobertura de áreas urbanas residenciales. Tendrán mayor valor de aptitud aquellas categorías que han cambiado de un uso no urbano en 1990 a un uso urbano en 2010, en base al cruce tabular de las dos fechas. Se reclasificaron las categorías en el siguiente orden de aptitud: Agrícola (1), Vegetación natural (2), Frutihortícola (3), Bosque (4), resto de las categorías (5). Se realizó la estandarización fuzzy, lineal decreciente (255-0 de 1 a 5).

Resultado-Factor 3: Aptitud de categorías a cambiar a uso urbano compacto.

Para la definición de áreas de aptitud urbana se consideraron dos capas temáticas de restricciones: las superficies artificiales y áreas naturales y de protección de cauces hídricos. En este caso, se han considerado el Parque Nacional Ciervo de los Pantanos y la Reserva Natural del Pilar.

A continuación, se presentan los resultados de aplicar el método de ponderación. Se consideran los tres factores para la definición de la aptitud urbana y se le asigna un peso de importancia (Tabla 3).

Tabla 3. Ponderación de factores (Urbano compacto).

Criterios	Ranking(r _j)	Proporcionalidad(1/r _j)	Ponderación (1/r _j)/Σ(1/r)
1-Distancia a áreas urbanas actuales	1	1	0.5
2-Distancia a redes de transporte	2	0.5	0.25
3-Categorías más propensas de cambiar a uso urbano:	2	0.5	0.25
Suma		2	1

Fuente: Elaboración propia

Aptitud Urbano disperso:

La aptitud para la expansión urbana ha sido calculada con 3 capas temáticas a partir de los siguientes criterios:

Factores:

Distancia a áreas urbanas actuales (Año 2010):

Se considerarán las áreas urbanas en su modalidad dispersa. Tendrán mayor aptitud para el desarrollo urbano las áreas cercanas a la misma, considerando los 5.000 metros como la distancia más propicia para la expansión urbana a partir de la cual va decreciendo la aptitud.

Se reclasificaron las áreas urbanas. Se realizó el cálculo de distancias y estandarización fuzzy lineal decreciente (255-0 de 2.000 a 6.000 metros).

Resultado-Factor 1: Aptitud de distancia a la aglomeración.

Distancia a redes de transporte:

Este criterio considera que las áreas más óptimas para el desarrollo urbano son aquellas que se encuentran cercanas a la red de transporte, siendo los 3000 metros considerados como la distancia óptima a partir de la cual va decreciendo la aptitud.

Se reclasificaron las vías de transporte. Se realizó el cálculo de distancias y estandarización fuzzy lineal decreciente (255-0 de 2.000 a 4.000 metros).

Resultado-Factor 2: Aptitud de distancia a red de transporte.

Categorías más propensas de cambiar a urbano:

Se considera la susceptibilidad de cada categoría de cambiar al uso urbano. Tendrán mayor valor de aptitud aquellas categorías que han cambiado de un uso no urbano en 1990 a un uso urbano en 2010, en base al cruce tabular de las dos fechas. Se reclasificaron las categorías en el siguiente orden de aptitud: Agrícola (1), Humedal (2), Vegetación natural (3), Bosque (4), resto de las categorías (5). Se realizó la estandarización fuzzy, lineal decreciente (255-0 de 1 a 5). Se consideraron las mismas capas temáticas que para los procedimientos de aptitud urbana compacta.

A continuación, se presentan los resultados de aplicar el método de ponderación. Se consideran los tres factores para la definición de la aptitud urbana dispersa y se le asigna un peso de importancia (Tabla 4).

Tabla 4. Ponderación de factores (Urbano disperso).

Criterios	Ranking(r_j)	Proporcionalidad($1/r_j$)	Ponderación ($1/r_j / \sum(1/r)$)
1-Distancia a áreas urbanas actuales	2	0.5	0.25
2-Distancia a redes de transporte	1	1	0.5
3-Categorías más propensas de cambiar a uso urbano:	2	0.5	0.25
Suma		2	1

Fuente: Elaboración propia

Aptitud Industrial-Comercial:

Factor:

Categorías más propensas de cambiar a uso Industrial-Comercial:

Se considera la susceptibilidad de cada categoría de cambiar al uso Industrial-Comercial. Tendrán mayor valor de aptitud aquellas categorías que han cambiado de un uso no industrial-comercial en 1990 a un uso industrial-comercial en 2010, en base al cruce tabular de las dos fechas. Se reclasificaron las categorías en el siguiente orden de aptitud: Agrícola (1), Vegetación natural (2), resto de las categorías (3). Se realizó la estandarización fuzzy, lineal decreciente (255-0 de 1 a 3). Se consideraron las mismas capas temáticas que para los procedimientos de aptitud urbana.

Aptitud Redes de transporte:

Factor:

Para la definición de la aptitud de las redes de transporte, se consideró el propio uso, asignándole el mayor valor de aptitud. Previamente, se reclasificó esa capa temática asignándole valor 1. Se realizó la estandarización fuzzy, lineal decreciente.

Aptitud Deportivo-Recreativo:

Factor:

Categorías más propensas de cambiar a uso Deportivo-Recreativo:

Se considera la susceptibilidad de cada categoría de cambiar al uso Deportivo-Recreativo. Tendrán mayor valor de aptitud aquellas categorías que han cambiado de un uso no deportivo-recreativo en 1990 a un uso deportivo-recreativo en 2010, en base al cruce tabular de las dos fechas. Se reclasificaron las categorías en el siguiente orden de aptitud: Agrícola (1), Vegetación natural (2), resto de las categorías (3). Se realizó la estandarización fuzzy, lineal decreciente (255-0 de 1 a 3).

Se consideraron las mismas capas temáticas que para los procedimientos de aptitud urbana.

Aptitud Agrícola:

Factor:

Categorías más propensas de cambiar a uso Agrícola:

Se considera la susceptibilidad de cada categoría de cambiar al uso Deportivo-Recreativo. Tendrán mayor valor de aptitud aquellas categorías que han cambiado de un uso no agrícola en 1990 a un uso agrícola en 2010, en base al cruce tabular de las dos fechas. Se reclasificaron las categorías en el siguiente orden de aptitud: Ganadero (1), Vegetación natural (2), Humedales (3), Bosques (4), Frutihortícola (5), resto de las categorías (6). Se realizó la estandarización fuzzy, lineal decreciente (255-0 de 1 a 6). Se consideraron las áreas urbanas como restricción al uso agrícola.

Aptitud Frutihortícola:

Factor:

Categorías más propensas de cambiar a uso Frutihortícola:

Se considera la susceptibilidad de cada categoría de cambiar al uso Frutihortícola. Tendrán mayor valor de aptitud aquellas categorías que han cambiado de un uso no frutihortícola en 1990 a un uso frutihortícola en 2010, en base al cruce tabular de las dos fechas. Se reclasificaron las categorías en el siguiente orden de aptitud: Agrícola (1), Ganadero (2), Vegetación natural (3), resto de las categorías (4). Se realizó la estandarización fuzzy, lineal decreciente (255-0 de 1 a 4). Se consideraron a las superficies artificiales como restricción al uso frutihortícola.

Aptitud Ganadero:

Factor:

Categorías más propensas de cambiar a uso Ganadero:

Se considera la susceptibilidad de cada categoría de cambiar al uso Ganadero. Tendrán mayor valor de aptitud aquellas categorías que han cambiado de un uso no ganadero en 1990 a un uso ganadero en 2010, en base al cruce tabular de las dos fechas. Se reclasificaron las categorías en el siguiente orden de aptitud: Agrícola (1), Vegetación natural (2), Humedales (3), resto de las categorías (4). Se realizó la estandarización fuzzy, lineal decreciente (255-0 de 1 a 4). Se consideraron a las superficies artificiales como restricción al uso ganadero.

Aptitud Bosque-Forestal:

Factor:

Para la definición de la aptitud de Bosque-Forestal, se consideró el propio uso, asignándole el mayor valor de aptitud. Previamente, se reclasificó esa capa temática asignándole valor 1. Se realizó la estandarización fuzzy, lineal decreciente.

Aptitud Vegetación natural:

Factor:

Categorías más propensas de cambiar a uso Vegetación natural:

Se considera la susceptibilidad de cada categoría de cambiar al uso Vegetación natural. Tendrán mayor valor de aptitud aquellas categorías que han cambiado de un uso no correspondiente a Vegetación natural en 1990 al uso Vegetación natural en 2010, en base al cruce tabular de las dos fechas. Se reclasificaron las categorías en el siguiente orden de aptitud: Humedal (1), Bosque (2), Agrícola (3), Frutihortícola (4), resto de las categorías (5). Se realizó la estandarización fuzzy, lineal decreciente (255-0 de 1 a 5). Se consideraron a las superficies artificiales como restricción al uso Vegetación natural.

Aptitud Humedal:



Factor:

Para la definición de la aptitud de Humedal, se consideró el propio uso, asignándole el mayor valor de aptitud. Previamente, se reclasificó esa capa temática asignándole valor 1. Se realizó la estandarización fuzzy, lineal decreciente.

Aptitud Cursos de agua:

Factor:

Para la definición de la aptitud de Humedal, se consideró el propio uso, asignándole el mayor valor de aptitud. Previamente, se reclasificó esa capa temática asignándole valor 1. Se realizó la estandarización fuzzy, lineal decreciente.

5.3. Autómatas celulares (CA_MARKOV)

Como hemos señalado en el apartado metodológico, el modelo CA-Markov tiene una alta capacidad para simular con mayor precisión los patrones de cambio de los usos, al considerar la variable espacial. En este sentido, el modelo evalúa el estado actual de las categorías de usos de cada celda o pixel y los estados de las celdas vecinas de manera tal que pueda generar una predicción del estado futuro más probable.

En nuestro caso de estudio, se utilizó CA_Markov para la modelización prospectiva del crecimiento urbano y cambios de usos en el periodo comprendido entre los años 1990 y 2030, considerando la dinámica histórica de los patrones de ocupación del terreno.

Para la aplicación de dicho modelo, se ha considerado el mapa de usos del año 2010, el archivo de áreas de transición generado en el módulo de cadenas de Markov (1990-2010) y las capas temáticas de idoneidad o aptitud al cambio, que se han obtenido a partir de la metodología de evaluación multicriterio. Para el modelo se debe especificar la cantidad de veinte iteraciones (correspondientes a los años de proyección desde 2010), y un filtro de contigüidad estándar de 5x5 como definición de vecindad.

Los procedimientos del modelo de CA_Markov han permitido generar como resultado final, la proyección de cambios de usos hacia el año 2030. A partir de la [Figura 5](#), podemos observar el mapa que representa la configuración espacial futura de las categorías de análisis.

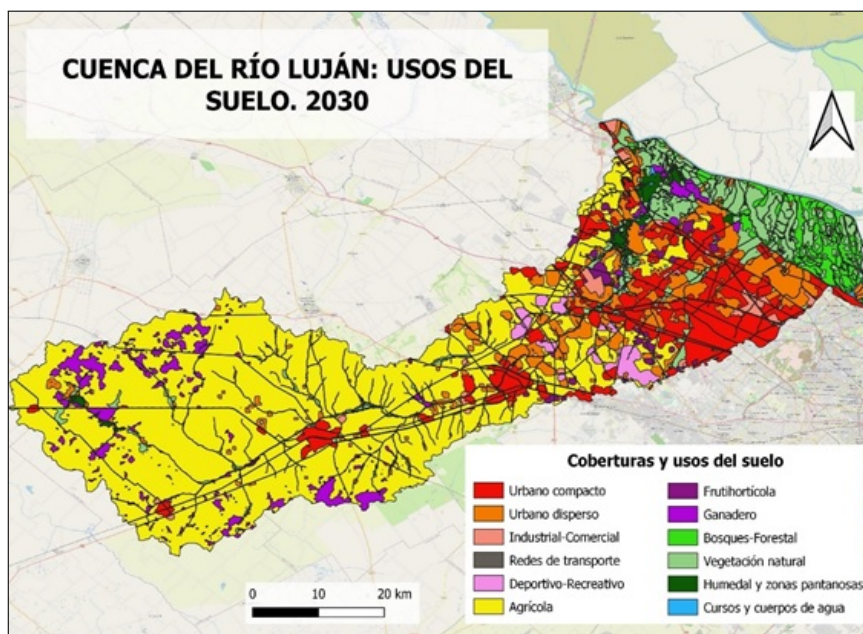


Figura 5. Modelo espacial prospectivo. Año: 2030.

Fuente: Elaboración propia.

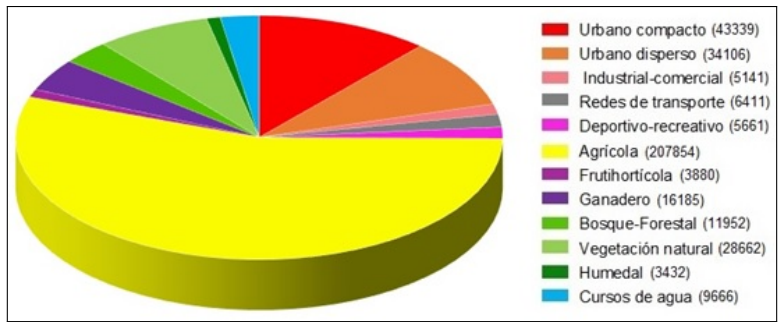


Figura 6. Superficie de usos de la tierra. Año: 2030.

Fuente: Elaboración propia.

El gráfico de la [Figura 6](#), determina que las categorías ocupan la siguiente superficie, ordenadas de mayor a menor ocupación: Agrícola (207.854 ha), seguido de Urbano compacto (43.339 ha), Urbano disperso (34.106 ha), Vegetación natural (28.662 ha), Ganadería (16.185 ha), Bosque-Forestal (11.952 ha), Cursos y cuerpos de agua (9.666 ha), Redes de transporte (6.411 ha), Deportivo-recreativo (5.661 ha), Industrial-comercial (5.141 ha), Frutihortícola (3.880 ha), y Humedal (3.432 ha).

5.4. Calibración y validación del modelo

En esta instancia se procedió a la evaluación y calibración del modelo a partir de aplicar el modelo Markov, considerando como mapa inicial, aquel referido al año 1990 y el segundo mapa fue el correspondiente al año 2000. Para la aplicación del modelo de validación, se ha considerado el mapa de usos del año 2000, el archivo de áreas de transición generado en el módulo de cadenas de Markov (1990-2000) y las capas temáticas de idoneidad o aptitud al cambio, que se han obtenido a partir de la metodología de evaluación multicriterio del año 2000. Para el modelo se debe especificar la cantidad de diez iteraciones (correspondientes a los años de proyección desde 2000), y un filtro de contigüidad estándar de 5x5 como definición de vecindad.

Como hemos señalado en el apartado metodológico, el análisis comparativo entre el modelo proyectado y el mapa real, se realizó a partir de dos procedimientos ([Buzai y Baxendale, 2011](#)): el conteo y cálculo de porcentajes de coincidencias y el cálculo del índice Kappa. Para ello se procedió a partir de la tabulación cruzada para comparar la correspondencia espacial entre ambas capas temáticas. Se generó la siguiente matriz de correspondencias, en valores absolutos ([Tabla 5](#)) y en porcentajes ([Tabla 6](#)).

Tabla 5. Validación en valores absolutos.

		2010 Realidad											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
1	351357	665	256	177	0	1733	952	3849	478	2198	0	0	361665
2	23	109294	66	0	0	0	0	0	0	17	0	0	109400
3	0	113	34667	0	0	1911	0	5	4269	61	0	0	41026
4	21	5	13	66068	0	282	0	0	0	79	0	0	66468
5	29	1402	11	3	8932	14487	0	214	0	171	0	0	25249
6	20783	38382	3486	2590	7497	2180300	2039	64082	2952	8648	1168	0	2331927
7	2524	1784	566	10	682	52033	30986	666	0	2379	0	0	91630
8	0	502	0	0	0	89915	0	166763	118	2876	1403	0	261577
9	482	2957	0	49	7	11425	0	310	174676	15318	923	0	206147
10	13487	31651	3002	141	0	71216	790	15150	993	310617	398	0	447445
11	0	12129	0	0	0	14194	0	6674	0	17276	83833	0	134106
12	0	0	0	18	0	8	0	0	0	0	0	104418	104444
Total	388706	198884	42067	69056	17118	2437504	34767	257713	183486	359640	87725	104418	4181084

Fuente: Elaboración propia



Tabla 6. Validación en proporciones.

2010 Realidad													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
1	90.4	0.3	0.6	0.3	0.0	0.1	2.7	1.5	0.3	0.6	0.0	0.0	96.8
2	0.0	55.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	55.1
3	0.0	0.1	82.4	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	2.3	0.0	0.0	0.0	84.9
4	0.0	0.0	0.0	95.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	95.7
5	0.0	0.7	0.0	0.0	52.2	0.6	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	53.6
6	5.3	19.3	8.3	3.8	43.8	89.4	5.9	24.9	1.6	2.4	1.3	0.0	206.0
7	0.6	0.9	1.3	0.0	4.0	2.1	89.1	0.3	0.0	0.7	0.0	0.0	99.1
8	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	3.7	0.0	64.7	0.1	0.8	1.6	0.0	71.1
9	0.1	1.5	0.0	0.1	0.0	0.5	0.0	0.1	95.2	4.3	1.1	0.0	102.8
10	3.5	15.9	7.1	0.2	0.0	2.9	2.3	5.9	0.5	86.4	0.5	0.0	125.2
11	0.0	6.1	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	2.6	0.0	4.8	95.6	0.0	109.6
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	100.0
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	

Fuente: Elaboración propia

Se aplicó la fórmula para el cálculo de porcentajes de coincidencias, que procede a partir de la sumatoria de la diagonal de la matriz dividido por el conteo total de píxeles multiplicado por cien. Se ha obtenido una correspondencia del 87%, lo cual indica una alta correspondencia con la situación conocida.

Se calcularon las estadísticas Kappa, como medida cuantitativa de la precisión proporcional entre los resultados proyectados por el modelo y aquellos que se dan en la realidad. Esto se realizó utilizando el módulo VALIDATE en TerrSet. Se evaluaron las estadísticas Kappa (K), para ver la similitud en la clasificación entre el mapa de usos conocido y el proyectado de 2010. Dado que todas las estadísticas Kappa arrojadas por el módulo (Kstandard = 80 %, Kno = 85 % y Klocality = 86 %) superan el 80 %, el modelo predictivo generado por CA-Markov, cuenta con los parámetros requeridos para su validación.

6. Consideraciones finales

La dinámica de crecimiento de las áreas urbanas es uno de los procesos que genera la competencia espacial entre usos en la franja urbano-rural de las grandes áreas metropolitanas, tal como es el caso de la cuenca del río Luján en el contexto de la Región Metropolitana de Buenos Aires. En este sentido, el avance urbano tiende a ocupar superficies destinadas a otros usos o coberturas naturales, en localizaciones que presentan altas aptitudes para las actividades económicas y otras para la conservación ambiental. Es así como resulta de suma utilidad la aplicación de metodologías orientadas a determinar cuáles son los conflictos entre usos de la tierra que se podrían generar a partir de la tendencia de la expansión urbana futura.

Para ello, resulta fundamental contar con una de las herramientas que nos brinda la Geografía Cuantitativa basada en el uso de los SIG, en su postura de ciencia prospectiva, y que corresponde a los modelos espaciales predictivos. En este sentido, a lo largo del trabajo se han desarrollado los procedimientos metodológicos para la modelización espacial del crecimiento urbano y de usos de la tierra. Se han aplicado cadenas de Markov, técnicas de Evaluación Multicriterio y la simulación espacial a partir de autómatas celulares, obteniendo resultados satisfactorios en la validación del modelo hacia 2030.

Los resultados cartográficos y cuantitativos presentan una alta capacidad como herramienta de planificación para la generación de propuestas de áreas según niveles de aptitud, tanto para el desarrollo de actividades residenciales, producción primaria y conservación ambiental. En nuestro caso de estudio, el objetivo radica en evaluar los posibles conflictos entre usos a partir de la expansión urbana futura, determinando cuáles serían los sitios más aptos para el desarrollo urbano, de tal manera que se minimicen los impactos negativos en otros

usos de la tierra.

Referencias bibliográficas

- Aguilera Benavente, F., Plata Rocha, W., Bosque Sendra, J. y Gómez Delgado, M. (2009). Diseño y simulación de escenarios de demanda de suelo urbano en ámbitos metropolitanos. *Revista Internacional Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, (4), 57-80. <https://upcommons.upc.edu/server/api/core/bitstreams/2d8dbc32-6f7d-4fff-be34-78604a468fbc/content>
- Aguilera Benavente, F., Gómez Delgado, M. y Plata Rocha, W. (2012). Escenarios y modelos de simulación como instrumento de planificación de ámbitos metropolitanos. En M. Gómez Delgado y V. M. Rodríguez Espinosa (Coords), *Análisis de la dinámica urbana y simulación de escenarios de desarrollo futuro con Tecnologías de la Información Geográfica* (pp. 185-234). Ra-Ma
- Aguilera Ontiveros, A. (2002). *Ciudades como tableros de ajedrez. Introducción al modelado de dinámicas urbanas con autómatas celulares*. El Colegio de San Luis.
- Arellano, B. y Roca, J. (2010). El Urban Sprawl, ¿Un Fenómeno de Alcance Planetario? Los Ejemplos de México y España. *Arquitectura, Ciudad y Entorno*, (12), 115-147.
- Batty, M. (2005). Approaches to Modelling in GIS: Spatial Representation and Temporal Dynamics. En D. J. Maguire, M. Batty y M. F. Goodchild (Eds.), *GIS, Spatial Analysis, and Modelling* (pp. 41-61). ESRI Press.
- Buzai, G. D. (2010). *Geografía y Sistemas de Información Geográfica. Aspectos conceptuales y aplicaciones*. Universidad Nacional de Luján.
- Buzai, G. D. y Baxendale, C. A. (2011). *Análisis socioespacial con Sistemas de Información Geográfica. Tomo 1: Perspectiva científica/Temáticas de base raster*. Lugar Editorial.
- Buzai, G. D. y Baxendale, C. A. (2013). Aportes del análisis geográfico con Sistemas de Información Geográfica como herramienta teórica, metodológica y tecnológica para la práctica del ordenamiento territorial. *Persona y Sociedad*, 27(2), 113-141. <https://doi.org/10.53689/pys.v27i2.43>
- Buzai, G. D. y Lanzelotti, S. (2019). *Atlas de Geografía Humana de la cuenca del río Luján*. Universidad Nacional de Luján.
- Cardozo, O., Vera, C. y Godoy, R. (2021). Detección de cambios en las coberturas de la tierra en el Gran Resistencia entre 1990 y 2020. *Boletín Digital del Instituto de Geografía*. Facultad de Humanidades. Universidad Nacional del Nordeste. <http://repositorio.unne.edu.ar/handle/123456789/33820>
- Clarke, K. C., Hoppen, S., & Gaydos, L. J. (1997). A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(2), 247-261. <https://doi.org/10.1068/b240247>
- Conway, J. (1970). The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game Life. *Scientific American*, 223, 120-123.
- DeMers, M. (2002). *GIS Modeling in Raster*. John Wiley.
- Eastman, J. R., Kyrem, P. A. K., Toledano, J. y Jin, W. (1993). A procedure for multi-objective decision making in GIS under conditions of competing objective. *Proceedings of EGIS*, 93, 438-447.
- Giglio, M. A. y Mancuello, G. (10 al 13 de noviembre 2020). Instrumentos para el abordaje del crecimiento urbano [Ponencia]. *SI+Herramientas y procedimientos, XXXIV Jornadas de Investigación, XVI Encuentro Regional*, Buenos Aires. <https://publicacionescientificas.fadu.uba.ar/index.php/actas/article/view/2314>
- Gómez, L. (2021). *Detección de cambios de usos del suelo y simulación de escenarios futuros en ciudades intermedias de corrientes* [Tesis de Doctorado en Agrimensura, Universidad Nacional de Catamarca]. <https://riaa-tecno.unca.edu.ar/handle/123456789/191>
- Gómez Delgado, M. y Barredo Cano, J. I. (2006). *Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Alfaomega-Ra-Ma.



- Gómez Delgado, M. y Rodríguez Espinosa, V. M. (2012). *Análisis de la Dinámica Urbana y Simulación de Escenarios de Desarrollo Futuro con Tecnologías de la Información Geográfica*. Ra-Ma.
- Henríquez Ruíz, C. (2014). *Modelando el crecimiento de las Ciudades Medias*. Ediciones UC.
- Humacata, L. (2018). Análisis espacial de los cambios de usos del suelo con Sistemas de Información Geográfica. *Revista Cartográfica*, (98), 239-257. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i98.149>
- Humacata, L. (2025). *Análisis espacial del crecimiento urbano y conflictos ante cambios de usos del suelo en la cuenca del río Luján (Provincia de Buenos Aires, Argentina), en el periodo 1990-2010 y su modelización hacia 2030. Diagnóstico y propuestas basadas en Sistemas de Información Geográfica* [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional del Sur].
- Instituto Nacional de Estadística y Censos [INDEC] (2026). *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022: resultados definitivos*. <https://www.indec.gob.ar/>
- Instituto Nacional del Agua [INA] (2007). *Diagnóstico del funcionamiento hidrológico hidráulico de la cuenca del río Luján – Provincia de Buenos Aires. Delimitación de zonas bajo riesgo hídrico* [INFORME LHA 284-01-2007 - Informe final, Junio de 2007]. <http://www.delriolujan.com.ar/estudioina.html>
- Lara, B. (2014). *Fragmentación de pastizales en el centro de la provincia de Buenos Aires mediante imágenes LANDSAT* [Tesis de Maestría en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Azul].
- Linares, S. (2015). Aplicación de modelos de simulación de crecimiento urbano. En G. D. Buzai, G. Cacace, L. Humacata y S. L. Lanzelotti (Comps.), *Teoría y métodos de la Geografía Cuantitativa. Libro 1: Por una Geografía de lo real* (pp. 231-247). MCA Libros.
- Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis*. John Wiley & Sons.
- Manzano, F. y Velázquez, G. (2015). La evolución de las ciudades intermedias en la Argentina. *Revista GeoUERJ*, (27), 258-282. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2015.18859>
- Martínez Vega, J., Echavarría Daspert, P. y González Cascón, V. (2008). Detección de cambios en los usos del suelo de la Alcarria Conquense: análisis de su sostenibilidad. *Serie Geográfica*, 2007-2008(14), 147-161. <http://hdl.handle.net/10017/2084>
- Matteucci, S., Morello, J., Buzai, G., Baxendale, C., Silva, M., Mendoza, N., Pengue, W. y Rodríguez, A. (2006). *Crecimiento urbano y sus consecuencias sobre el entorno rural. El caso de la ecorregión pampeana*. Orientación Gráfica Editora.
- ONU-Hábitat (2020). *Informe mundial de las ciudades 2020. El valor de la urbanización sostenible*. Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos. <https://onu-habitat.org/images/WCR2020/>
- Paegelow, M., Camacho Olmedo, M.T. y Menor Toribio, J. (2003). Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje. *GeoFocus*, (3), 22-44. <https://geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/21/204>
- Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2009). Cambios de usos del suelo y expansión urbana en la comunidad de Madrid (1990-2000). *Scripta Nova. Revista electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, 13(293). <https://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-293.htm>
- Polidori, M. C. (2004). *Crecimiento urbano e ambiente: un estudio exploratorio sobre las transformaciones y el futuro de las ciudades* [Tesis de Doctorado en Ecología, Universidad Federal de Río Grande do Sul, Porto Alegre].
- Pontius, R. G., Shusas, E. y 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>
- Príncipi, N. (2016). *Evaluación Multicriterio para la identificación de áreas con potencial conflicto entre usos del suelo en la cuenca del río Luján (Buenos Aires, Argentina)* [Tesis de Maestría en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección, Universidad de Costa Rica y Universidad Nacional. Costa Rica].
- Ramírez, L. y Pértile, V. C. (2013). Cambio de uso de suelo y tendencias de la expansión urbana entre 1990 y

- 2030 en Juan José Castelli y Villa Ángela, Chaco, Argentina. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica*, (5), 194-216. <https://revistageosig.wixsite.com/geosig>
- Salazar Proaño, E. (2020). *Configuración de la nueva Área Metropolitana de Quito. Usos del suelo y escenarios futuros para la planificación* [Tesis doctoral, Pontificia Universidad Católica de Chile].
- Sang, L., Zhang, C., Yang, J., Zhu, D. y Yun, W. (2011). Simulation of land use spatial pattern of towns and villages based on CA-Markov model. *Mathematical and Computer Modelling*, 54, 938-943.
- Tobler, W. R. (1979). Cellular Geography. En S. Gale y G. Olsson (Eds.), *Philosophy in Geography* (pp 379-386). D. Reidel Publishing Co.
- Tomlin, C. D. (1990). *Geographic Information Systems and Cartographic Modeling*. Prentice Hall.
- White, R. y Engelen, G. (1993). Cellular dynamics and GIS: modelling spatial complexity. *Geographical Systems*, 1, 237-253.
- White, R., Engelen, G. y Uljee, I. (1997). The use of constrained celular autómatas for high-resolution modelling of urban land-use dynamics. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 24(3), 323-343. <https://doi.org/10.1068/b240323>
- Vapñarsky, C. A. y Gorojovsky, N. (1990). *El crecimiento urbano en la Argentina*. Grupo Editor Latinoamericano.**
- Xie, Y. y Sun, Z. (2000). *Dynamic Urban Evolution Model Base don Cellular Autómata*. Igre. Ypsilanti.

Notas

1. El procedimiento de validación considera varios componentes, como estadísticas asociadas al índice general, tales como kappa estándar, kappa para cantidad y kappa para ubicación, que han sido incluidos en el módulo de Validación del software TerrSet. ↑
2. Los valores en porcentajes indican la probabilidad de cambio de un uso hacia otra categoría, desde el año 2010 a 2030, a partir del periodo 1990-2010. Aquellos valores que se encuentran distinguidos entre paréntesis, indican la probabilidad de cambio de un uso a la misma categoría. ↑

