

Artículo original

Prospectiva territorial del uso y cobertura del suelo: escenarios de planificación para el cantón Cuenca hacia 2030

Carlos Rodrigo Tenesaca Pacheco ^[1] 

[1] Universidad del Azuay. Cuenca, Ecuador.



Autor para correspondencia: crtenesaca@uazuay.edu.ec

Resumen

La construcción de escenarios prospectivos, mediante modelos de simulación de uso y cobertura del suelo, constituye una herramienta estratégica para anticipar, prevenir y mitigar dinámicas insostenibles asociadas a los patrones de consumo y producción que inciden directamente en el desarrollo territorial. Esta investigación tiene como objetivo aportar a la generación de escenarios futuros a partir del análisis prospectivo del uso y cobertura de suelo en el cantón Cuenca - Ecuador, hacia el 2030. La metodología integró la prospectiva estratégica con el modelo CA-Markov, siguiendo un proceso estructurado en tres fases: (a) análisis de los cambios espacio-temporales de la cobertura y el uso del suelo, así como el cálculo de las probabilidades de transición para el período 2000–2018; (b) elaboración de mapas de idoneidad de transición mediante integración de técnicas de lógica difusa (fuzzy), Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y Evaluación Multicriterio (MCE); y (c) validación del modelo CA-Markov y simulación de escenarios prospectivos al 2030. Los resultados evidencian que, entre los años 2000 y 2018, las coberturas naturales disminuyeron de forma significativa, mientras que las áreas agropecuarias y usos antrópicos registraron una expansión, tendencias que, se proyectan continuar hacia el 2030. Este análisis espaciotemporal no solo permite una comprensión integral de la dinámica del territorio, sino que se consolida como un insumo fundamental para la planificación y la gestión territorial. Este enfoque facilita la articulación de criterios técnicos, académicos y de planificación con las demandas de la sociedad civil, contribuyendo al diseño de estrategias orientadas a promover un desarrollo territorial sostenible del cantón.

Palabras Clave: *modelos prospectivos; ordenamiento territorial; cambio de uso de suelo.*

Article

Territorial foresight of Land Use and Land Cover: Planning scenarios for the canton of Cuenca toward 2030

Abstract

The construction of prospective scenarios through land use and land cover simulation models constitutes a strategic tool for anticipating, preventing, and mitigating unsustainable dynamics associated with consumption and production patterns that directly affect territorial development. This research aims to contribute to the generation of future scenarios based on a prospective analysis of land use and land cover in the canton of Cuenca, Ecuador, toward the year 2030. The methodology integrated strategic foresight with the CA-Markov model, following a structured process organized into three phases: (a) analysis of spatio-temporal changes in land use and land cover, as well as the calculation of transition probabilities for the period 2000–2018; (b) development of transition suitability maps through the integration of fuzzy logic techniques, the Analytic Hierarchy Process (AHP), and Multi-Criteria Evaluation (MCE); and (c) validation of the CA-Markov model and simulation of prospective scenarios to the 2030 horizon. The results indicate that, between 2000 and 2018, natural land-cover classes declined significantly, while agricultural areas and anthropogenic land uses expanded—trends that are projected to continue toward 2030. This spatio-temporal analysis not only enables a comprehensive understanding of territorial dynamics but also consolidates its role as a fundamental input for territorial planning and management. Moreover, this approach facilitates the articulation of technical, academic, and planning criteria with the demands of civil society, contributing to the design of strategies aimed at promoting sustainable territorial development within the canton.

Keywords: *prospective models; territorial planning; land-use change.*

Cita sugerida: Tenesaca-Pacheco, C. (2026). Prospectiva territorial del uso y cobertura del suelo: escenarios de planificación para el cantón Cuenca hacia 2030. *Revista Científica FINIBUS – Ingeniería, Industria y Arquitectura*, 9(17), 44-54. <https://doi.org/10.56124/finibus.v9i17.004>

DOI: <https://doi.org/10.56124/finibus.v9i17.004>

Recibido: 28-08-2025

Revisado: 18-10-2025

Aceptado: 19-11-2025

Publicado: 01-01-2026

1. Introducción

El cambio de uso y cobertura del suelo constituye uno de los fenómenos más significativos de las últimas décadas, al reflejar la interacción entre dinámicas sociales, económicas y ambientales en los territorios. Dichos procesos, lejos de ser neutros, revelan tensiones entre modelos de desarrollo, intereses colectivos y privados, así como las limitaciones de los marcos institucionales para gestionar de manera sostenible los recursos naturales (Gidey et al., 2017; Hamad et al., 2018; Rimal et al., 2017).

En este contexto, el suelo deja de ser entendido únicamente como soporte físico para convertirse en un espacio socialmente producido, en el que confluyen prácticas de apropiación, transformación y resistencia. La expansión urbana, la intensificación agrícola o la deforestación no solo alteran la configuración espacial del territorio, sino también las formas de vida y de organización comunitaria, impactando la seguridad alimentaria, la equidad territorial y la justicia ambiental (Herrera, & Ali, 2009; Ulloa-Espíndola, & Martín-Fernández, 2021).

Frente a esta complejidad, las ciencias sociales han destacado la necesidad de integrar herramientas analíticas que permitan anticipar escenarios de cambio y fortalecer la capacidad de decisión de actores locales y nacionales. La prospectiva estratégica surge como un enfoque clave en este campo, pues facilita la construcción de futuros posibles y deseables a partir del análisis de tendencias y la deliberación colectiva (Astigarraga, 2016; Miklos, 2002; Sánchez, 2018).

Paralelamente, en el ámbito de la geografía y los estudios territoriales se han desarrollado modelos de simulación espacial, entre los cuales destacan las cadenas de Markov y los autómatas celulares (CA-Markov). Estos modelos permiten analizar la dinámica de transformación del suelo, integrando información espacial y temporal, y generando proyecciones que resultan fundamentales para la planificación territorial (Al-Sharif & Pradhan, 2014; Gidey et al., 2017; Hyandye & Martz, 2017).

La pertinencia social de estas metodologías radica en su capacidad de traducir datos complejos en escenarios comprensibles para la gestión pública y comunitaria. Al generar simulaciones sobre la expansión urbana o la degradación ambiental, los modelos CA-Markov facilitan el diálogo entre ciencia, política y sociedad, y ofrecen un marco técnico para tomar decisiones más transparentes y participativas (Avalos et al., 2019; Rimal et al., 2017).

Asimismo, su uso fomenta una visión de largo plazo que contrasta con las prácticas tradicionales de planificación, generalmente fragmentadas y a corto plazo. La prospectiva estratégica, en diálogo con la modelación espacial, impulsa un cambio de paradigma hacia políticas públicas orientadas

por escenarios de sostenibilidad, resiliencia y justicia ambiental (Sánchez, 2018; Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2016).

Las metodologías basadas en CA-Markov y prospectiva estratégica constituyen un puente entre el análisis científico y la acción social, ofreciendo marcos de interpretación y decisión que vinculan los cambios territoriales con las aspiraciones colectivas de desarrollo. Su adopción, especialmente en regiones de alta fragilidad ecológica y social, se vuelve una necesidad impostergable para garantizar un ordenamiento territorial que articule sostenibilidad, equidad y resiliencia en el marco de los desafíos del siglo XXI.

2. Metodología

2.1. Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el cantón Cuenca perteneciente a la provincia del Azuay, localizada en la región centro sur de Ecuador, entre la latitud 2° 50'00 S y longitud 79° 10'W.

El cantón Cuenca posee 21 parroquias rurales y 15 parroquias urbanas que en conjunto comprenden un área territorial de 3.195 km². Su cota varía desde los 300 hasta los 4.398 m.s.n.m, con pendientes desde los 0° hasta más 58° grados consideradas muy escarpadas.

2.2. Procesamiento de la información

El procesamiento de la información cartográfica se realizó con el software QGIS Hannover (versión 3.16.5), mientras que el análisis y modelamiento de los usos de suelo se efectuó mediante la herramienta Land Change Modeler for Ecological Sustainability, integrada en el TerrSet Geospatial Modeling and Monitoring System (Clark Labs, versión 18.2).

La metodología se estructuró en tres etapas principales:

- a) Cambios espaciotemporales de uso y cobertura de suelo, así como el cálculo de las probabilidades de transición para el período 2000–2018.
- b) Mapas de idoneidad de transición mediante integración de técnicas de lógica difusa (fuzzy), Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y Evaluación Multicriterio (MCE).
- c) Validación del modelo CA-Markov y simulación de escenarios prospectivos al 2030 (Ver Figura 1).

a) Análisis de los cambios espaciotemporales de la cobertura y el uso del suelo, así como el cálculo de las probabilidades de transición para el período 2000–2018

Los mapas de cobertura y uso de suelo se generaron para los años 2000, 2008 y 2018, tomando como insumo la cartografía histórica del Ministerio del Ambiente del Ecuador (<http://ide.ambiente.gob.ec/mapainteractivo/>). La información fue validada, editada y estandarizada a partir de

cinco imágenes satelitales *Landsat Thematic Mapper*¹ (TM) y *Operational Land Imager*² (OLI), definiendo ocho clases de cobertura.

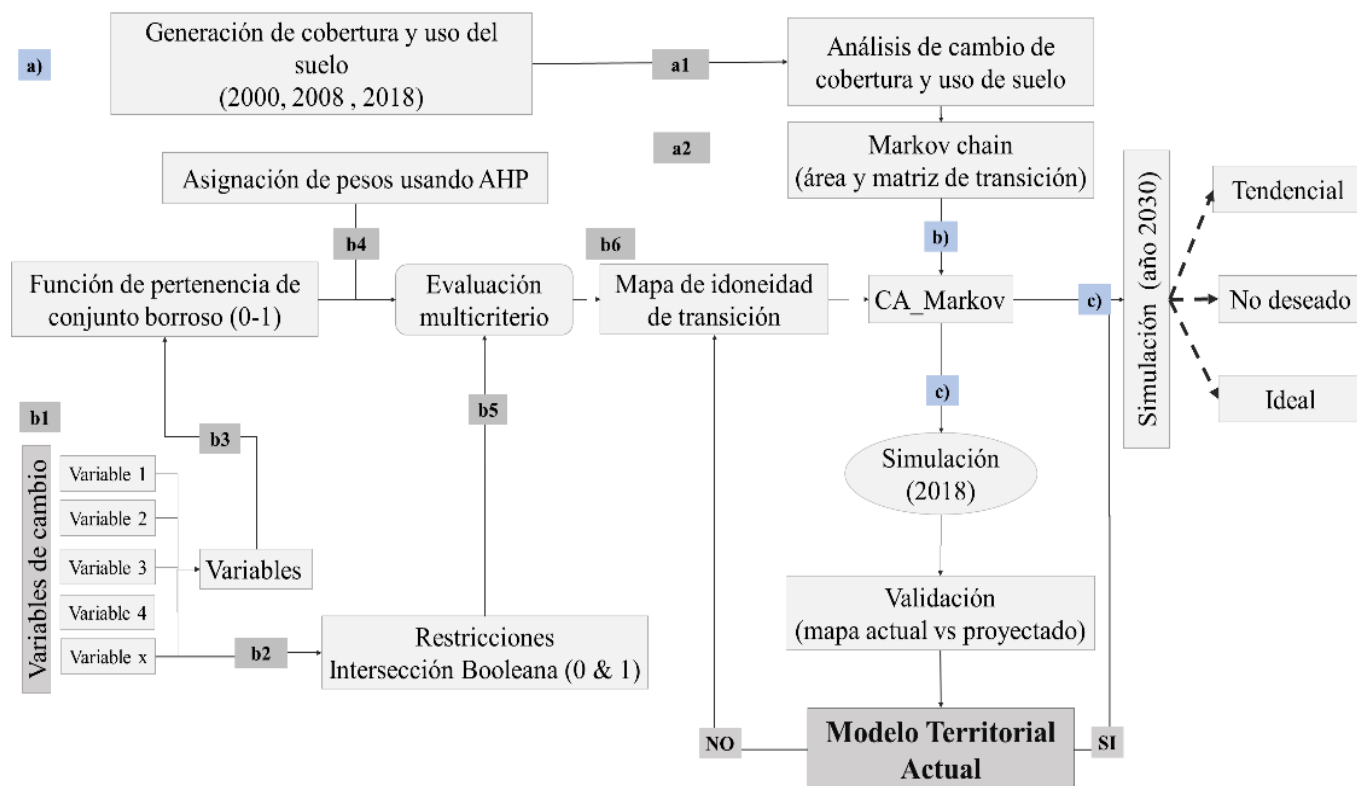


Figura 1: Diagrama esquemático de simulación de cambio de uso de suelo con CA_Markov. Fuente: Adaptado de Das y Sarkar (2019, fig. 3); Gidey et al. (2017, fig. 2); Hyandye y Martz (2017, fig. 3); Keshkar y Voigt (2016, pp. 2–6).

Posteriormente, se evaluaron los cambios ocurridos entre periodos para identificar ganancias y pérdidas de coberturas.

El cálculo de la tasa de cambio se realizó mediante:

$$\left(\frac{\# \text{ Pixels changed for a class}}{\text{total area of the land cover map}} \right) * 100$$

Y el cálculo de la tasa anual de cambio, se calcula en función de:

$$R = (A1 - A2) / (t2 - t1)$$

donde **R** es la deforestación total anual promedio; **A1** el área inicial; **A2** el área final; y **t1** y **t2** los años de inicio y fin del periodo.

Con base en el análisis anterior, se aplicó el modelo de cadenas de Markov. Se definió el periodo base entre 2000 (t1) y 2008 (t2), considerando un intervalo de ocho años. Posteriormente, se proyectó un escenario tendencial al 2018, incorporando como parámetros un valor de celda de fondo de 0,0 y un error proporcional de 0,15.

Esto permitió obtener la matriz de probabilidad de transición y las áreas de transición de cambio de uso, insumos esenciales para la proyección al horizonte 2030.

La matriz de probabilidad se calculó mediante:

$$X = \sum \left(\frac{(O-E)^2}{E} \right)$$

donde **X** es la matriz de probabilidad de transición, **O** el número observado de transiciones y **E** el número esperado.

¹ Imágenes disponibles: 3 de noviembre de 2001, 9 de noviembre del 2009 y 31 de julio de 2007

² Imágenes disponibles: 20 de noviembre del 2016 y 7 septiembre de 2018

b) Elaboración de mapas de idoneidad de transición mediante integración Fuzzy-AHP-MCE

Los mapas de idoneidad³ se elaboraron estableciendo reglas de transición entre coberturas, considerando factores de cambio y restricciones. Se aplicaron funciones de pertenencia difusa (Fuzzy), el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) de Saaty y la Evaluación Multicriterio (MCE) (Gidey et al., 2017; Hamad et al., 2018).

De acuerdo con Gidey et al., (2017), la proximidad a elementos biofísicos es un factor crítico en la dinámica de

cambio. Otros autores destacan, además, el peso de variables socioeconómicas en estos procesos (Gidey et al., 2017; Hyandye & Martz, 2017; Rimal et al., 2017).

Las variables consideradas incluyeron: proximidad a adjudicaciones de agua, centros poblados, clases agrológicas, equipamientos, pendientes, movimientos en masa, vías y áreas protegidas, etc. (Ver Figura 2).

La estandarización de las restricciones se realizó en escala booleana (0 = no idóneo; 1 = idóneo).

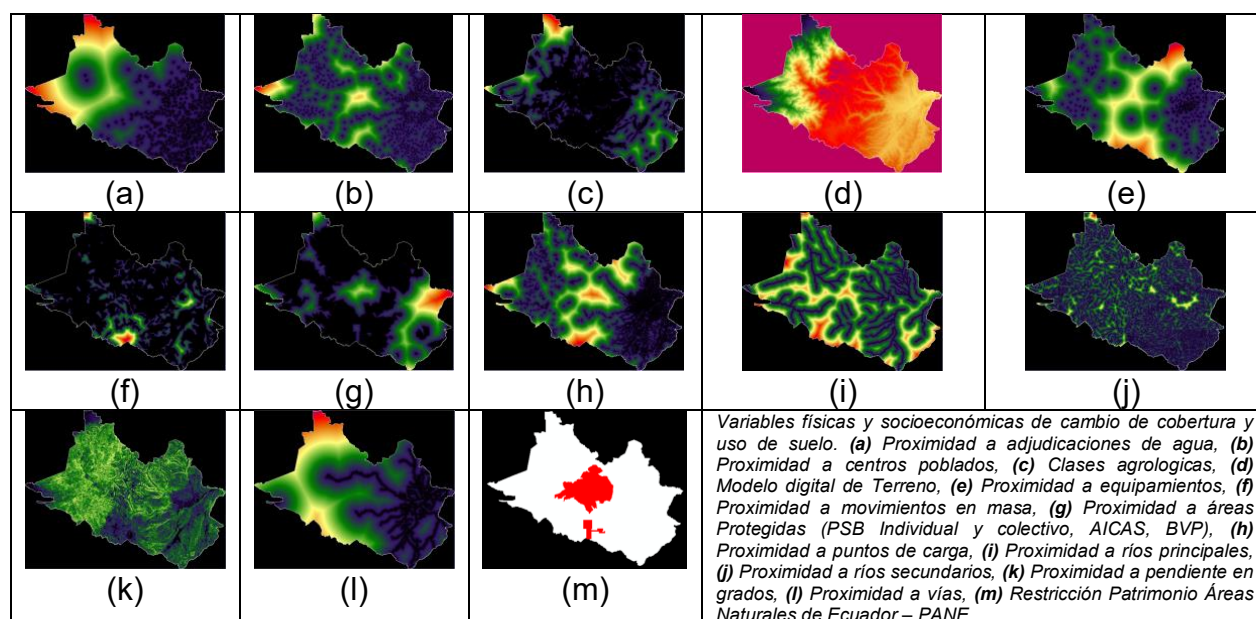


Figura 2: Proximidad a variables biofísicas y socio económicas.

c) Validación del modelo CA-Markov y simulación de escenarios prospectivos al 2030

El poder predictivo del modelo se evaluó comparando el escenario tendencial proyectado al 2018 con el mapa actual del mismo. La validación se efectuó mediante el Índice Kappa de Concordancia, el cual mide la similitud en la ubicación de las coberturas (Keshtkar & Voigt, 2016; Pontius, 2000). Se consideró válido el modelo cuando el índice fue superior a 0.8 (Das & Sarkar, 2019).

Finalmente, a partir de las matrices de transición y mapas de idoneidad, se generaron tres escenarios de cambio de uso y cobertura de suelo al año 2030: tendencial, ideal y no

deseado. Estos escenarios se construyeron desde la línea base 2000–2018 y fueron ajustados mediante la validación de un panel de expertos, incorporando criterios técnicos y consideraciones territoriales relevantes. Ver Tabla 1 y Tabla 2

3. Resultados y discusión

El análisis de los cambios de uso y cobertura de suelo en el cantón Cuenca entre 2000 y 2018 confirma un patrón de transformación acelerada de los ecosistemas naturales, con la pérdida sostenida de bosque nativo, páramo y vegetación arbustiva, los cuales fueron reemplazados progresivamente por tierras agropecuarias y zonas antrópicas.

proceso permitió consensuar de manera técnica la selección de los factores de cambio, las restricciones, los conjuntos difusos y los valores de ponderación, aportando solidez metodológica y legitimidad social a la toma de decisiones; los resultados se presentan en las Tablas 1 y 2.

³ Con el propósito de fortalecer y validar los escenarios de planificación territorial, el grupo de investigación UDA–IERSE desarrolló talleres participativos con la participación de seis expertos de distintas disciplinas (Ingeniería Agronómica, dos especialistas en Ingeniería Ambiental, Ingeniería de Sistemas, Ingeniería de Minas, Biología y Arquitectura). Este

Tabla 1: Factores, tipos / formas de funciones de membresía, puntos de control y escenarios utilizados para el desarrollo del mapa de idoneidad.

Factor	Membership function type	Membership functions shape	Puntos de control
A	Linear	Monotonically increasing	(1) a= 50 b= 100 (2) a= 0 b= 50 (3) a= 100 b= 150
B	Linear	Monotonically decreasing	(1) c= 1000 d= 2200 (2) c= 1200 d= 2500 (3) c= 250 d=1000
C	Linear	Monotonically increasing	(1) a= 100 b= 5000 (3) a= 1000 b= 5000
D	Sigmoidal	Monotonically symmetric	(1,3) a=0 b=1500 c=2500 d=3300 (2) a=0 b=1500 c=2800 d=3400
E	Linear	Monotonically decreasing	(1) c= 1000 d= 1500 (2) c=1500 d=3000 (3) c=300 d= 1000
F	Linear	Monotonically increasing	(1) a= 100 b= 5000 (3) a= 1000 b=5000
G	Linear	Monotonically decreasing	(1) c= 500 d= 1500 (3) c= 1000 d= 1500
H	Linear	Monotonically decreasing	(1) c= 300 d= 1000 (2) c= 150 d=2000 (3) c= 100 d=500
I	Linear	Monotonically increasing	(1) a= 50 b= 100 (2) a= 0 b= 50 (3) a= 100 b= 150
J	Linear	Monotonically increasing	(1) a= 100 b= 1500 (2) a= 50 c=1000 (3) a= 200 b= 1500
K	Sigmoidal	Monotonically decreasing	(1) c= 0 d= 30 (2) c= 0 d= 35 (3) c= 0 d= 25
L	Linear	Monotonically symmetric	(1) a=0 b=30 c=50 d=100 (2) a=0 b=50 c=100 d=150 (3) a=0 b=30 c=50 d=90
M		Restricción	

Tabla 2: Pesos de cada factor considerado en este estudio. Tendencial (1), No deseado (2) e ideal (3).

Cód.	Factores	Escenarios (ponderación)		
		1	2	3
a	Proximidad adjudicaciones de agua (m)	0,0619	0,0424	0,0803
b	Proximidad centros poblados (m)	0,0993	0,1647	0,034
c	Proximidad clases agrológicas (m)	0,0290	----	0,0734
d	Modelo Digital del Terreno (m.s.n.n)	0,0633	0,0653	0,1165
e	Proximidad equipamientos (m)	0,0960	0,1894	0,03
f	Proximidad movimientos en masa (m)	0,0383	----	0,0776
g	Proximidad programa socio bosque (m)	0,0705	----	0,1374
h	Proximidad puntos eléctricos (m)	0,1064	0,1731	0,0273
i	Proximidad ríos principales (m)	0,1167	0,0452	0,1095
j	Proximidad ríos secundarios/quebradas (m)	0,0577	0,0452	0,0975
k	Pendiente (grados)	0,1168	0,0631	0,1816
l	Proximidad a vías (m)	0,1442	0,2115	0,0348
m	Restricción: Parque Nacional Cajas	X	X	X
	Total	1	1	1

Estos resultados concuerdan con investigaciones en otras regiones andinas del Ecuador, donde el avance de la frontera agropecuaria ha representado uno de los principales motores de deforestación (Ulloa-Espíndola & Martín-Fernández, 2021; Tapia-Armijos et al. 2015). La dinámica espacial se concentró en tres áreas críticas: (a) Chaucha y Molleturo, donde los bosques nativos ceden frente a la expansión agropecuaria; (b) Tarqui, Cumbe, Victoria del Portete y

Quingeo, con tradición ganadera y fuerte presión sobre ecosistemas frágiles; y (c) las parroquias cercanas a la cabecera urbana, donde la urbanización se convierte en el principal motor de cambio (Figura 3). Este patrón espacial coincide con lo evidenciado por Tapia-Armijos et al. (2015), quienes documentaron la fragmentación del paisaje asociada a la urbanización y la agricultura intensiva en la Sierra sur ecuatoriana.

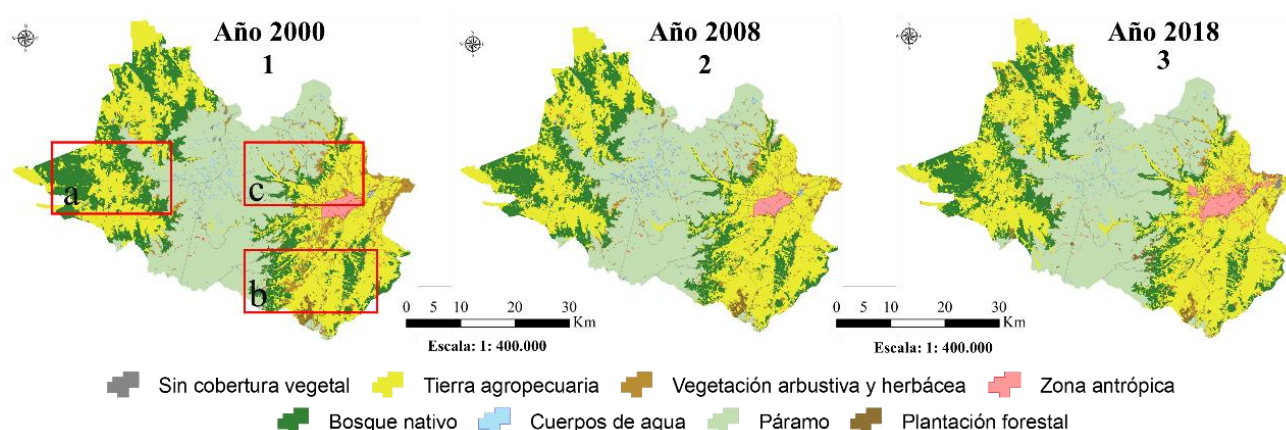


Figura 3: Mapas de uso y cobertura de suelo del cantón Cuenca. Parroquias Rurales: Zona (a) Chaucha y Molleturo, Zona (b) Tarqui, Cumbe, Victoria del Portete y Quingeo y Zona (c) Sayausi, Sinincay, San Joaquín y Cuenca (urbano)

Los datos cuantitativos revelan pérdidas anuales significativas: -496,29 ha de bosque nativo, -342,08 ha de vegetación arbustiva y -99,86 ha de páramo. Por su parte, las mayores ganancias se concentran en tierras agropecuarias (+723,08 ha) y zonas antrópicas (+226,22 ha) (ver Tabla 3). Estas cifras reflejan la presión combinada de la urbanización y la expansión agrícola, una dinámica reportada también en Colombia y Perú, donde la ganadería extensiva y la informalidad urbana han impulsado procesos de cambio territorial similares (Hernández-Gómez, Rojas-Robles, & Sánchez-Calderón, 2013; Herrera, A., & Ali, Maurizio, 2009).

El uso del modelo CA_Markov permitió proyectar escenarios prospectivos al 2030 con alta fiabilidad, corroborada por valores elevados en los índices Kappa ($K_{no} = 0,927$; $K_{standard} = 0,902$). Este nivel de precisión es consistente con lo reportado por Avalos et al. (2019) y Rimal et al. (2017), quienes destacan la capacidad del modelo para sustentar procesos de planificación territorial. En el caso de Cuenca, estos escenarios ofrecen una base técnica para orientar políticas hacia un desarrollo sostenible y equilibrado.

Tabla 3: Análisis de cambio de uso y cobertura de suelo en el periodo 2000 - 2018

Uso y cobertura de suelo	2000	2008	2018	Tasa de cambio anual
Bosque nativo	65.442,5	62.630,6	56.509,2	-496,3
Cuerpos de agua	2.311,6	2.315,5	1.964,6	-19,3
Páramo	116.984,2	115.803,4	115.186,6	-99,9
Plantación forestal	3.499	2.755,5	2.933,4	-31,4
Sin cobertura vegetal	397,5	206,6	1.110,8	39,6
Tierra agropecuaria	113.303,6	123.729,4	126.319,1	723,1
Vegetación arbustiva y herbácea	14.261,6	8.516,2	8.104,1	-342,1
Zona antrópica	3.318,8	3.561,5	7.390,9	226,2

Los escenarios prospectivos revelan trayectorias contrastantes. Los tres escenarios muestran trayectorias contrastantes: el tendencial y el no deseado proyectan una reducción continua de coberturas naturales, mientras que el ideal plantea la recuperación de bosques, páramos y vegetación arbustiva (Tabla 4). Este último escenario se alinea con los objetivos de conservación y restauración ecológica establecidos en la Estrategia Nacional de Biodiversidad del Ecuador (Ministerio del Ambiente, 2016), y demuestra la viabilidad de diseñar políticas basadas en la sostenibilidad.

La pérdida proyectada de 10.427,67 ha de bosque nativo en el escenario no deseado alerta sobre un riesgo ambiental crítico, ya que estos ecosistemas son clave para la regulación hídrica en la cuenca del río Tomebamba. Casos similares se han documentado en los Andes peruanos, donde la deforestación en cabeceras de cuenca compromete el suministro de agua potable para las ciudades (Che Piu & Menton, 2014). Esta comparación evidencia la necesidad de políticas integradas de conservación y ordenamiento territorial.

El análisis también destaca la relevancia de factores socioeconómicos y biofísicos como impulsores del cambio, en concordancia con Hyandye y Martz (2017). En Cuenca, la proximidad a vías principales, centros poblados y zonas de infraestructura explica la concentración de los procesos de cambio, lo cual es similar a lo encontrado por Ulloa-Espíndola & Martín-Fernández, 2021 en Quito, donde la expansión urbana se articula directamente con la accesibilidad vial y la presión inmobiliaria.

La inclusión de variables socioeconómicas y físicas en la modelación mejora la comprensión del sistema territorial, como sugieren Al-Sharif y Pradhan (2014). En América Latina, investigaciones aplicadas en la Amazonía brasileña y en la región andina muestran que los modelos híbridos de cambio de uso de suelo ofrecen una representación más realista de las dinámicas territoriales, al capturar tanto los procesos biofísicos como los económicos (Aguir et al., 2016).

Tabla 4: Análisis de cambio de uso y cobertura de suelo en el periodo 2018 - 2030

Uso y cobertura de suelo 2018		Modelos prospectivos		
		Tendencial 2030	No deseado 2030	Ideal 2030
Bosque nativo	56.509,2	48.819,8	46.081,5	57.855,7
Cuerpos de agua	1.964,6	1.531,2	1.545,4	1.350,7
Páramo	115.186,6	114.459,3	113.488,5	116.444,3
Plantación forestal	2.933,5	1.347,3	1.180,4	777,6
Sin cobertura vegetal	1.110,8	1.832,4	521,9	73,7
Tierra agropecuaria	126.319,1	134.569,6	137.119,8	123.479,8
Vegetación arbustiva y herbácea	8.104,1	5.386,5	5.154,8	12.127,5
Zona antrópica	7.390,9	11.572,8	14.426,4	7.409,4

Desde una perspectiva espacial, el escenario ideal evidencia la posibilidad de revertir tendencias negativas mediante acciones de restauración y conservación. En la zona (a), por ejemplo, la regeneración de bosques y páramos podría garantizar la conectividad ecológica, un aspecto que ya ha sido exitosamente implementado en proyectos de restauración de páramos en Cotopaxi y Tungurahua (Cuesta et al., 2014).

La zona (b), históricamente dedicada a la ganadería, muestra la importancia de promover alternativas productivas sostenibles, como la agroforestería o la ganadería regenerativa. Experiencias en Loja y Azuay han demostrado que la diversificación productiva puede reducir la presión sobre ecosistemas frágiles y mejorar los ingresos de las familias rurales (Cuesta et al., 2014).

En la zona (c), el crecimiento urbano proyectado en escenarios tendenciales y no deseados confirma la fragmentación de hábitats naturales. Este proceso ha sido documentado también en Quito y Bogotá, donde la expansión desordenada de la ciudad sobre suelos agrícolas ha reducido la resiliencia territorial Ulloa-Espíndola & Martín-Fernández, 2021. Para Cuenca, esto implica la necesidad de fortalecer instrumentos de planificación urbana que prioricen la densificación frente a la expansión horizontal.

Más allá de los patrones espaciales, los resultados reflejan que las limitaciones biofísicas de Cuenca, altitud, pendientes pronunciadas y recursos hídricos vulnerables no han sido suficientes para frenar el avance de la frontera agrícola y urbana. Como advierte Pinos (2016), este fenómeno

responde a una combinación de factores sociales y económicos que superan las restricciones naturales. Situaciones semejantes se observan en Bolivia, donde la

agricultura en laderas continúa expandiéndose pese a los altos costos ambientales (Zimmerer, 2015) (Ver Figura 4).

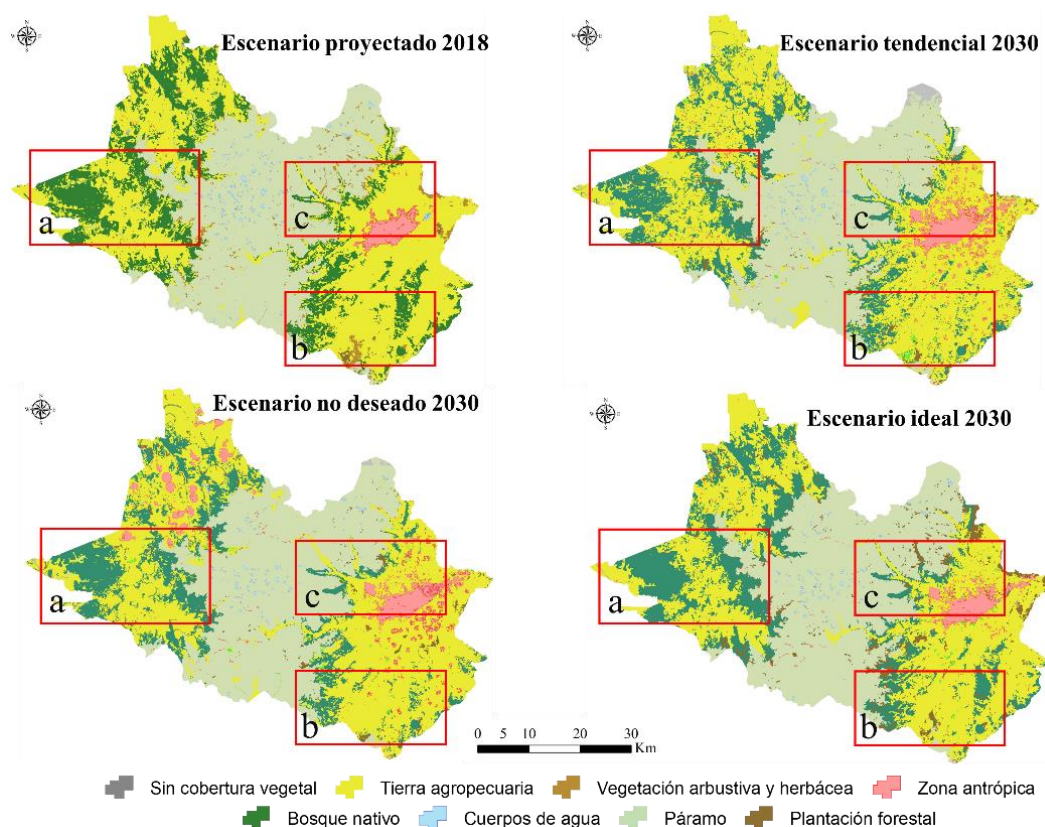


Figura 4: Modelos prospectivos del uso de suelo en el cantón Cuenca al 2030. Parroquias Rurales: Zona (a) Chaucha y Molleturo, Zona (b) Tarqui, Cumbe, Victoria del Portete y Quingeo y Zona (c) Sayausi, Sinincay

La discusión metodológica muestra que las técnicas prospectivas no deben limitarse al análisis cuantitativo, sino incorporar criterios de deseabilidad y probabilidad, como propone Miklos (2002). En este sentido, la integración del juicio experto con modelos espaciales, como se aplicó en este estudio, constituye una herramienta robusta para la toma de decisiones, especialmente en contextos latinoamericanos donde la incertidumbre es elevada (Omar et al., 2014) (Ver Figura 5).

La comparación con estudios previos (Pinos, 2016) confirma la tendencia hacia la reducción de coberturas naturales en Cuenca, aunque este trabajo aporta un análisis más detallado de las diferencias espaciales y la interacción entre factores socioeconómicos y biofísicos. Esto refuerza la necesidad de que los gobiernos locales integren el análisis de escenarios prospectivos en sus instrumentos de planificación territorial, en línea con las recomendaciones de Avalos et al. (2019).

Se reconoce que el uso de cadenas de Markov y de modelos prospectivos territoriales presenta limitaciones estructurales

que deben ser consideradas críticamente en los procesos de planificación. En primer lugar, los modelos Markovianos se basan en el supuesto de estacionariedad de las probabilidades de transición, lo que implica que las dinámicas futuras del uso y cobertura del suelo reproducen patrones del pasado, reduciendo su capacidad para incorporar cambios abruptos derivados de políticas públicas, transformaciones socioeconómicas, innovaciones tecnológicas o eventos ambientales extremos (Pontius, 2000; Das & Sarkar, 2019).

Asimismo, aunque su integración con autómatas celulares mejora la representación espacial, persisten dificultades para capturar la complejidad de los procesos territoriales, en particular aquellos vinculados a decisiones humanas, relaciones de poder, contextos institucionales y factores culturales, que no siempre son cuantificables ni fácilmente parametrizables (Barreira & Barros, 2017; Herrera & Ali, 2009). Desde la perspectiva de la prospectiva territorial, si bien esta aporta una visión estratégica orientada al largo plazo, su principal limitación radica en el carácter subjetivo de la construcción de escenarios, altamente dependiente de

los supuestos, la calidad de la información y la participación de los actores involucrados, lo que puede derivar en

escenarios normativos más deseables que plausibles (Miklos, 2002; Astigarraga, 2016).

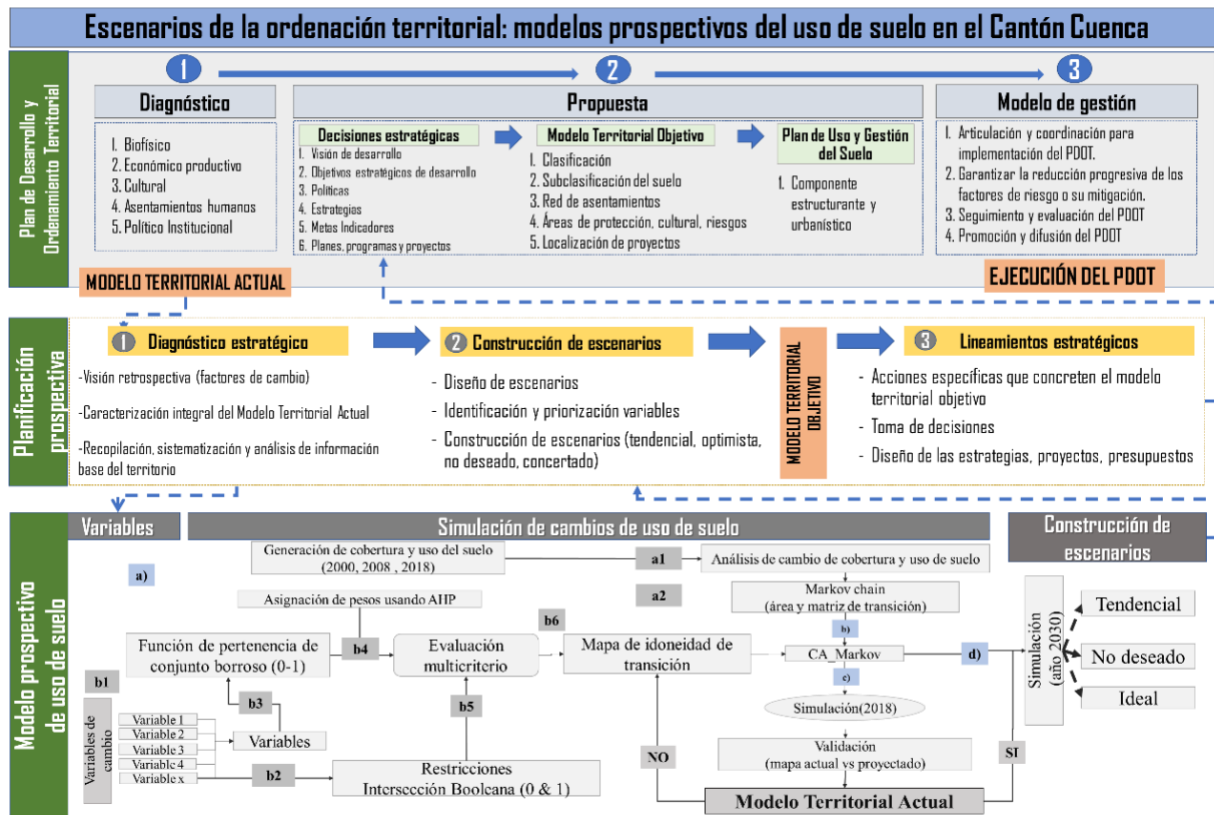


Figura 5: Articulación entre la prospectiva estratégica y CA-Markov

4. Conclusiones

El análisis de la dinámica de cambio de uso y cobertura de suelo en el cantón Cuenca evidencia transformaciones significativas entre 2000 y 2018, con una pérdida sostenida de ecosistemas naturales, principalmente bosques nativos, páramos y vegetación arbustiva. Estos cambios no son homogéneos, sino que se concentran en áreas críticas como Chaucha y Molleturo, donde la frontera agropecuaria avanza sobre los bosques; Tarqui y Victoria del Portete, con tradición ganadera y fuerte presión sobre ecosistemas frágiles; y las parroquias cercanas a la cabecera urbana, donde predomina la expansión urbana. Dichos resultados confirman que los ecosistemas de alta montaña, esenciales para la regulación hídrica y la biodiversidad, se encuentran bajo creciente amenaza.

Los datos cuantitativos corroboran estas tendencias, revelando pérdidas anuales de hasta -496 ha de bosque nativo y -342 ha de vegetación arbustiva, frente a un crecimiento notable de tierras agropecuarias (+723 ha/año) y zonas antrópicas (+226 ha/año). Estos hallazgos ponen en evidencia la presión combinada de la agricultura y la

urbanización sobre ecosistemas estratégicos, un fenómeno compartido con otros territorios andinos de Ecuador. La magnitud de estas cifras sugiere que, de no mediar acciones correctivas, se acentuará la fragmentación de hábitats y la disminución de servicios ecosistémicos críticos como la provisión de agua.

Los escenarios prospectivos hacia 2030 resaltan la importancia de anticipar las trayectorias del territorio: mientras los escenarios tendencial y no deseado proyectan una pérdida drástica de coberturas naturales (hasta -10.427 ha de bosque nativo), el escenario ideal plantea una recuperación significativa, con aumentos de hasta +1.346 ha de bosque y +1.257 ha de páramo. Este hallazgo clave demuestra que el futuro territorial no está predeterminado, sino que depende de las políticas públicas, la gobernanza ambiental y la implementación de estrategias de manejo sostenible.

La aplicación del modelo CA-Markov, combinada con el análisis jerárquico AHP y la integración de variables socioeconómicas y biofísicas, se consolidó como una herramienta robusta para la planificación territorial. La alta

consistencia obtenida en las validaciones ($CR < 0,1$; $Kappa > 0,9$) confirma su fiabilidad y pertinencia, no solo para el contexto de Cuenca, sino también para otros territorios andinos donde confluyen múltiples presiones antrópicas.

Este estudio pone en evidencia que la integración de la modelación espacial con enfoques prospectivos constituye un insumo clave para orientar decisiones estratégicas en el marco del desarrollo sostenible, en tanto permite identificar tendencias de cambio y construir escenarios contrastantes que revelan, de manera simultánea, los riesgos asociados a la inacción y las oportunidades para la conservación y la restauración territorial. No obstante, los resultados también confirman que tanto las cadenas de Markov como la prospectiva territorial deben ser comprendidas como herramientas complementarias y no deterministas, cuyo principal aporte no radica en la predicción exacta del futuro, sino en fortalecer la reflexión estratégica, la anticipación de dinámicas territoriales y la toma de decisiones informadas en los procesos de ordenamiento territorial y gestión ambiental, especialmente en contextos latinoamericanos caracterizados por una alta fragilidad ecológica.

Referencias

- Aguiar, A. P. D., Vieira, I. C. G., Assis, T. O., Dalla-Nora, E. L., Toledo, P. M., Santos-Junior, R. A. O., & Batistella, M. (2016). Land use change emission scenarios: Anticipating a forest transition process in the Brazilian Amazon? *Global Change Biology*, 22(5), 1821–1840. <https://doi.org/10.1111/gcb.13134>
- Al-Sharif, A. A. A., & Pradhan, B. (2014). Monitoring and predicting land use change in Tripoli Metropolitan City using an integrated Markov chain and cellular automata models in GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(10), 4291–4301. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-1119-7>
- Astigarraga, E. (2016). Prospektiva estratégica: Orígenes, conceptos clave e introducción a su práctica. *Revista Centroamericana de Administración Pública*, 71, 13–29. https://doi.org/10.35485/rcap71_1
- Avalos, A., Gómez Delgado, M., Aguilera Benavente, F., & Flores Vilchez, F. (2019). Simulación del crecimiento urbano de la zona metropolitana Tepic-Xalisco, México. *Estudios Geográficos*, 80(287), e021. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201938.018>
- Barreira, 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>
- Che Piu, H., & Menton, M. (2014). Contexto de REDD+ en el Perú: Motores, actores e instituciones. CIFOR Occasional Paper, 106.
- Cuesta, F., Sevink, J., Llambí, L. D., De Bièvre, B., & Posner, J. (Eds.). (2014). *Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos*. CONDESAN. ISBN: 978-612-45881-5-0
- Das, S., & Sarkar, R. (2019). Predicting the land use and land cover change using Markov model: A catchment level analysis of the Bhagirathi-Hugli River. *Spatial Information Research*, 27(4), 439–452. <https://doi.org/10.1007/s41324-019-00251-7>
- Eastman, J. R. (2016). *TerrSet—Geospatial Monitoring and Modeling System Manual*. Clark University. <https://www.clarku.edu/centers/geospatial-analytics/publications/>
- GAD Municipal Cuenca. (2021). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Cuenca-Actualización 2021. Plan de Uso y Gestión del Suelo del Cantón Cuenca.
- Gidey, E., Dikinya, O., Sebege, R., Segosebe, E., & Zenebe, A. (2017). Cellular automata and Markov Chain (CA_Markov) model-based predictions of future land use and land cover scenarios (2015–2033) in Raya, northern Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 3(4), 1245–1262. <https://doi.org/10.1007/s40808-017-0397-6>
- Gómez Orea, D. (1993). Ordenación del territorio: Una aproximación desde el medio físico.
- Hamad, R., Balzter, H., & Kolo, K. (2018). Predicting land use/land cover changes using a CA-Markov model under two different scenarios. *Sustainability*, 10(10), 3421. <https://doi.org/10.3390/su10103421>
- Hernández-Gómez, A., Rojas-Robles, R., & Sánchez-Calderón, F. V. (2013). Cambios en el uso del suelo asociados a la expansión urbana y la planeación en el corregimiento de Pasquilla, zona rural de Bogotá (Colombia). *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 22(2), 257–271.
- Herrera, A., & Ali, Maurizio. (2009). Paisajes del desarrollo: La ecología de las tecnologías andinas. *Antípoda. Revista de Antropología y Arqueología*, (8), 169–194. <http://ref.scielo.org/tm74j6>
- Hyandye, C., & Martz, L. W. (2017). A Markovian and cellular automata land-use change predictive model of the Usangu Catchment. *International Journal of Remote Sensing*, 38(1), 64–81. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1259675>
- Keshtkar, H., & Voigt, W. (2016). Potential impacts of climate and landscape fragmentation changes on plant distributions: Coupling multi-temporal satellite imagery with GIS-based cellular automata model. *Ecological Informatics*, 32, 145–155. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2016.02.002>
- Miklos, T. (2002). *Planeación prospectiva: Una estrategia para el diseño del futuro*. México: Limusa: Centro de

estudios prospectivos Fundación Javier Barros Sierra. ISBN-13: 978-968-18-3848-5

Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE). (2016). Estrategia Nacional de Biodiversidad al 2030. Quito: MAE.

Omar, N. Q., Sanusi, S. A. M., Hussin, W. M. W., Samat, N., & Mohammed, K. S. (2014). Markov-CA model using analytical hierarchy process and multiregression technique. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 20, 012008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/20/1/012008>

Pinos, N. (2016). Prospective land use and vegetation cover on land management—Case canton Cuenca. Estoa, 5(9), 7–19. <https://doi.org/10.18537/est.v005.n009.02>

Pontius, R. G. (2000). Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. Photogrammetric Engineering, 6.

Rimal, B., Zhang, L., Keshtkar, H., Wang, N., & Lin, Y. (2017). Monitoring and modeling of spatiotemporal urban expansion and land-use/land-cover change using integrated Markov chain cellular automata model. ISPRS International Journal of Geo-Information, 6(9), 288. <https://doi.org/10.3390/ijgi6090288>

Sánchez, Á. C. (2018). Planificación para el desarrollo con enfoque prospectivo en Bolivia, Ecuador, Guatemala y Perú. Pensamiento Crítico, 22(2), 73. <https://doi.org/10.15381/pc.v22i2.14331>

Secretaría Técnica Planifica Ecuador. (2019). Guía para la formulación/actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial.

Tapia-Armijos, M. F., Homeier, J., Espinosa, C. I., Leuschner, C., & de la Cruz, M. (2015). Deforestation and forest fragmentation in South Ecuador since the 1970s: Losing a hotspot of biodiversity. PLoS ONE, 10(9), e0133701. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133701>

Ulloa-Espíndola, R., & Martín-Fernández, S. (2021). Simulation and analysis of land use changes applying cellular automata in the south of Quito and the Machachi Valley, Province of Pichincha, Ecuador. Sustainability, 13(17), 9525. <https://doi.org/10.3390/su13179525>

Zimmerer, K. S. (2015). Environmental governance through “speaking like an indigenous state” and respatializing resources: Ethical livelihood concepts in Bolivia as versatility or verisimilitude? Geoforum, 64, 314–324. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2013.07.004>

Contribución de los autores (CRediT)

Tenesaca Pacheco, C.: Conceptualización, Análisis formal de datos, Investigación, Metodología, Redacción - borrador original, Redacción – revisión y edición.

El autor ha leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Agradecimientos

El autor agradece a la Universidad del Azuay por el financiamiento del proyecto de investigación del cual se deriva el presente artículo. De igual forma al equipo del Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador - IERSE (<https://ierse.uazuay.edu.ec/>) por su valioso apoyo como grupo de expertos en la validación de los escenarios prospectivos. Asimismo, a la arquitecta Cristina Chuquihuanga por su acompañamiento académico como directora de la tesis de la Maestría en Ordenación del Territorio en la Universidad de Cuenca.

Disponibilidad de datos

Los datos que respaldan los hallazgos de este estudio están disponibles a solicitud razonable al autor de correspondencia.

Conflicto de intereses

El autor ha declarado que no existe conflicto de intereses en esta obra.

Declaración sobre el uso de IA generativa y tecnologías asistidas por IA

El manuscrito no incluye una declaración específica respecto al uso de herramientas de inteligencia artificial durante su proceso de redacción. La autoría, así como la responsabilidad total del contenido, recaen exclusivamente en los autores.

Nota del Editor

Descargo de responsabilidad: Los datos, declaraciones, opiniones contenidas en el documento son responsabilidad únicamente de los autores y no de la *Revista Científica FINIBUS – Ingeniería, Industria y Arquitectura*. La Revista y sus editores renuncian a toda responsabilidad por daño a persona o propiedad resultante de los métodos, instrucciones, producto o idea mencionado en el contenido.



Derechos de autor 2026.

Esta obra está bajo una licencia: Internacional Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0

Revista Científica *FINIBUS* - ISSN: 2737-6451.

