

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE ARQUITECTURA, DISEÑO Y ARTES

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE
MAGÍSTER EN URBANISMO MENCIÓN
GOBERNANZA Y PLANIFICACIÓN URBANA CON ENFOQUE
AL CAMBIO CLIMÁTICO

MODELAMIENTO DEL CRECIMIENTO URBANO DE CUENCA
MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE SENSORES REMOTOS Y
ANÁLISIS GEOESPACIAL

Volumen I
Trabajo Titulación

MARILYN VANESA CEPEDA VELASTEGUI

DIRECTOR: FELIPE VALDEZ

QUITO – ECUADOR
2022

Presentación

*“La ciencia del donde nos permite comprender los
patrones del mundo y nos encamina un futuro mejor”*

Autora

Dedicatoria

A mis amadas madres Nancy y Demetria Velastegui, a mi hermana y mejor amiga Cristina Rodríguez, a mi padre de corazón Germán Rodríguez, a mi abuelita Demetria Rodríguez, mi ángel sempiterno. A mi tío Rodri, *me preferiti*.
A mis amigas queridas que han trascendido. A mi querido Steven.
“Ego meum heros”

Agradecimiento

Mis agradecimientos a mi Director, Felipe, por su apoyo a lo largo de la realización del presente trabajo.
I express my sincere thanks to Pratyush Tripathy, for sharing his knowledge to the world and making it useful for developing countries like mine.

INDICE

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
INTRODUCCIÓN.....	5
ANTECEDENTES	7
JUSTIFICACION	8
OBJETIVOS	10
Objetivo general	10
Objetivos específicos.....	10
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	11
1.1 Modelo de datos vectorial	11
1.2 Modelo de datos ráster	12
1.2.1 Modelo Digital de Elevación (<i>Digital Elevation Model</i> – DEM).....	12
1.2.2 Imágenes satelitales Landsat	13
1.3 Clasificación de imágenes	15
1.3.1 Supervisada	15
1.3.2 No supervisada.....	16
1.4 Análisis espacial (geoespacial)	16
1.5 Autómatas celulares y el crecimiento urbano.....	17
1.6 El proceso histórico de urbanización de Cuenca	18
1.7 Estudios locales del crecimiento urbano de Cuenca	21
CAPÍTULO 2. MARCO METODOLÓGICO	22
2.1 Área de estudio.....	22
2.2 Recopilación de insumos base	23
2.3 Depuración y tratamiento de insumos base	25
2.3.1 Imágenes Satelitales Landsat.....	25
2.3.2 Modelo Digital de Elevación (DEM)	26
2.3.3 Tratamiento de variables/factores de crecimiento urbano.....	28
2.3.4 Clasificación de imágenes satelitales multiespectrales Landsat 5,7 y 8.....	29
2.4 Modelo autómatas celulares y simulación.....	30
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
3.1 Tratamiento de variables/factores de crecimiento urbano	32
3.1.1 Proximidad a centro de negocios.....	32

3.1.2 Áreas protegidas (restricción de urbanización)	32
3.1.3 Proximidad a vías principales	32
3.1.4 Pendientes	33
3.1.5 Densidad de población	34
3.2 Simulaciones	35
CONCLUSIONES	38
RECOMENDACIONES.....	39
BIBLIOGRAFÍA.....	40

RESUMEN

El modelamiento del crecimiento urbano de Cuenca, Ecuador se realizó mediante el monitoreo espacial y temporal del uso de suelo; para ello, se utilizaron imágenes satelitales multispectrales Landsat 5, 7 y 8 de los años 1989, 1998, 2007 y 2016, las cuales fueron clasificadas en suelo construido, vegetación, agua y otros. Para la integración de los patrones que motivan el crecimiento urbano se emplearon datos de población, la distancia al centro de negocios, red vial, datos de pendiente de la zona de estudio y áreas protegidas. Se normalizó la información a través de rasterizar todas las variables.

El modelamiento se basó en autómatas celulares y la integración de los factores de crecimiento urbano y sus respectivos umbrales, mediante lenguaje de programación Python y las librerías os, math, numpy y gdal. Se identificó un incremento de 124 km² a 225 km² de suelo urbanizado, entre 1998 y 2016 respectivamente. La simulación para el año 2025 prevé que existirán 334 km² de área edificada. El porcentaje precisión espacial final de suelo construido, calculado respecto a la ubicación espacial de los ráster clasificados y los simulados, fue de 84,93 considerado como moderadamente alto.

Palabras clave: expansión urbana, imágenes satelitales, autómatas celulares, planificación urbana.

ABSTRACT

The modeling of urban growth in Cuenca, Ecuador, was carried out through spatial and temporal monitoring of land use, using multispectral Landsat 5, 7 and 8 satellite images from 1989, 1998, 2007 and 2016, which were classified into built-up, vegetation, water and others. For the integration of the patterns that motivate urban growth, population data, distance to the business center, road network, slope data of the study area and protected areas were used. The information was normalized by rasterizing all variables.

The modeling was based on cellular automata and the integration of urban growth factors and their respective thresholds, using Python programming language and the os, math, numpy and gdal libraries. An increase from 124 km² to 225 km² of urbanized land was identified, between 1998 and 2016 respectively. The simulation for the year 2025 predicts that there will be 334 km² of built-up area. The final percentage of spatial accuracy of the built-up, calculated with respect to the spatial location of the classified and simulated raster, was 84.93, considered moderately high.

Keywords: urban sprawl, satellite imagery, cellular automata, urban planning.

INTRODUCCIÓN

La tendencia de crecimiento de las ciudades es un aspecto trascendental para la construcción del desarrollo sostenible y la lucha contra el cambio climático. En América Latina, múltiples urbes, presentan modelos urbanos dispersos y la planificación se encuentra en desfase con la realidad territorial (Cabrera-Jara et al., 2015; Chackiel et al., 2004; Hermida et al., 2015a, 2015b; Sánchez, 2013; Ulloa-Espíndola & Pérez-Albert, 2022).

Cuenca, la tercera ciudad más poblada del Ecuador, fue testigo de un gran crecimiento urbano a partir de los años 1950 y su predisposición de expansión urbana genera alarmas en la ruralidad y en la aspiración de conservación del Parque Nacional Cajas, que se encuentra cada vez más cerca de centros poblados (Álvarez & Serrano, 2010; Arroyave et al., 2006; Astudillo et al., 2015; Cabrera-Jara et al., 2015; Carpio, 1976; Hermida et al., 2015b; V. Mejía, 2014).

El acceso a información geoespacial, productos de sensores remotos y herramientas de análisis espacial ha dado paso a que se puedan llevar a cabo investigaciones enfocadas al urbanismo. Los modelos de autómatas celulares, regresión logística y modelos híbridos han tenido un alcance sin precedentes en la literatura de la geomática y análisis espacial (Aburas et al., 2016; Allen & Lu, 2003; Avalos Jiménez et al., 2019; Barredo et al., 2003; Batty, 2011; Batty et al., 1999; Bhatta, 2009; Chen et al., 2000; de Almeida et al., 2005; Gómez et al., 2021; He et al., 2018; Li & Gong, 2016; Linares & Clarke, 2018; Tripathy & Kumar, 2019; Weng, 2001; Yeh et al., 2021) .

En tal virtud, el presente trabajo ha realizado el estudio del crecimiento urbano de Cuenca, mediante la integración de productos de sensores remotos, análisis geoespacial y un modelamiento basado en autómatas celulares junto con parámetros que impulsan el crecimiento urbano como son la proximidad a centro de negocios, áreas con restricción de crecimiento, proximidad a red vial, orografía de la zona y concentración de población.

El proceso de urbanización que presenta la ciudad de Cuenca y sus núcleos urbanos hacen necesario el análisis de la realidad geoespacial basado en insumos actualizados, con el fin de deducir efectos futuros sobre las zonas rurales y áreas protegidas ubicadas en la circunscripción del área de interés.

ANTECEDENTES

El crecimiento urbano es un fenómeno estudiado a lo largo de todo el mundo, puesto que las proyecciones, según la Organización de Naciones Unidas (2018), indican que 68 % de la población vivirá en zonas urbanas en 2050.

Las áreas urbanas han aumentado constantemente a lo largo de la historia y este proceso continuará en el futuro, especialmente en los países menor desarrollo (Martine, 2007). Las ciudades de América Latina tienen altas tasas de urbanización, con ausencia de equipamientos, servicios básicos e infraestructura urbana adecuada para su desarrollo integral (V. Mejía, 2014; Sánchez, 2013). Es así como el conjunto conformado por el rápido crecimiento urbano, la ausencia de planificación y el cambio climático, se convierte en un gran desafío para los tomadores de decisiones (Sánchez, 2013).

En Ecuador, el cantón Cuenca y principalmente la ciudad, a partir de 1950, crece a un ritmo acelerado y las proyecciones reportadas por el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Cuenca (PDOT) 2015, indican que el 63,16 % de la población residirá en la ciudad para el año 2030 (Jaramillo, 2017). Este proceso de expansión urbana ha generado conurbaciones con las cabeceras parroquiales próximas, ocupando grandes proporciones del suelo periférico (V. Mejía, 2014). Un claro ejemplo es la distancia desde la parroquia rural de Baños, misma que en la actualidad se encuentran a 8 km de distancia de la ciudad; este fenómeno da lugar a que con tiempo las zonas rurales vayan transformándose a urbanas (Álvarez & Serrano, 2010).

La ciudad de Cuenca corresponde a la tercera ciudad más poblada en el Ecuador según los datos obtenidos en el censo de 2010; es una ciudad intermedia, que, en términos de dispersión urbana, aun no presenta los efectos negativos sociales y ambientales de un modelo poco compacto según Hermida et al. (2015). Sin embargo, las tendencias generan alertas sobre el crecimiento que está presentando la ciudad.

JUSTIFICACION

El crecimiento urbano indica desarrollo social y económico, sin embargo, la expansión urbana descontrolada presenta múltiples problemáticas, principalmente el deterioro de ecosistemas y pérdida de las tierras agrícolas, constituyéndose un tema central en el debate referente al cambio climático (Sánchez, 2013; Tripathy & Kumar, 2019). La planificación urbana es decisiva para el futuro de nuestra existencia, incluso múltiples organizaciones internacionales han llegado a considerar que el resultado de la batalla contra el cambio climático se verá determinado en las áreas urbanas (Sánchez, 2013)

Existen diversos análisis y estudios que alcanzan una visión amplia de la dinámica de la ciudad, no obstante, generar modelos de crecimiento urbano en base a la evaluación cuantitativa permite obtener una mejor aproximación a la realidad espacial de territorio (Avalos Jiménez et al., 2019).

La ciudad de Cuenca, al igual que la mayoría de las ciudades de América Latina, presenta un rápido crecimiento urbano¹, por lo que es indispensable monitorear su expansión urbana para la toma de decisiones sobre la planificación territorial y anticipar el alcance que tiene este fenómeno, considerando que en la circunscripción del cantón Cuenca, se encuentra el Parque Nacional Cajas, una de las zonas de protección más importantes del país. El Cajas posee 786 cuerpos de agua y es la principal fuente de provisión del recurso hídrico para las poblaciones cercanas, fue reconocido como Humedal de Importancia Internacional (sitio Ramsar); además, en el año 2014 la UNESCO lo declaró como una de las áreas núcleo de la Reserva de Biósfera Macizo El Cajas (Ministerio del Ambiente, 2015)

¹ Cuenca a partir de 1950 a 1975 creció más en superficie que en los cuatro siglos de existencia (Carpio, 1976).

En términos de población, en 1950, la zona urbana de Cuenca contaba con 39.983 habitantes según el Primer Censo Nacional de Población y para el año 2010 tenía un total de 329.928 habitantes (Hermida et al., 2015b).

La distancia aproximada desde el centro de la ciudad de Cuenca al Parque Nacional es de 29 km, sin embargo, actualmente las zonas pobladas se encuentran a menos de 20 km.

En vista de la importancia de contar con insumos de planeación urbana fundamentados en evaluaciones cuantitativas y enfocadas en la realidad espacial, se elaboró el análisis de la dinámica del crecimiento urbano de Cuenca a través de la integración de sensores remotos, análisis geoespacial y modelamiento a través de autómatas celulares, para predecir la expansión urbana que presentará el cantón.

Este estudio permite comprender como se han desarrollado las áreas urbanas en el territorio, apoyado en las tendencias y patrones históricos que presenta la zona de interés y en tal virtud prever el crecimiento. Es así como los insumos técnicos se pueden convertir en importantes aliados para direccionar las políticas públicas y planificar el territorio en base a su realidad espacial.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Construir un modelo de crecimiento urbano de Cuenca mediante la integración de sensores remotos y análisis geoespacial para predecir la expansión de la ciudad a través de autómatas celulares

Objetivos específicos

- Realizar el procesamiento espacial de los insumos base requeridos para el modelamiento, mediante la conversión de datos alfanuméricos y vectoriales a ráster con el fin de estandarizar la información
- Generar y calibrar un modelo de crecimiento urbano de Cuenca a través de autómatas celulares programado en Python
- Predecir del crecimiento urbano de Cuenca a 2025 mediante el modelo calibrado

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

En la presente investigación intervienen múltiples variables de tipo vectorial, ráster y alfanumérica. El uso de suelo será determinado mediante la integración de productos de sensores remotos (imágenes satelitales Landsat), mismos que serán clasificados en base a su configuración espectral. El DEM (*Digital Elevation Model*) permitirá obtener el parámetro de pendientes en la zona de estudio. El modelamiento de crecimiento urbano se realizará a través de autómatas celulares, que integrarán las variables y factores impulsores del crecimiento.

Además, para comprender el proceso de urbanización y crecimiento urbano de Cuenca, se recapitulan los principales eventos acaecidos a lo largo de la historia de la zona de estudio, las acciones que se han tomado respecto a la planificación territorial y las investigaciones locales referentes a la expansión de Cuenca.

Con los antecedentes expuestos, en la presente sección se detallará el marco teórico de la investigación.

1.1 Modelo de datos vectorial

El modelo vectorial recoge la variabilidad y características de la zona de estudio mediante entidades geométricas, para cada una de las cuales dichas características son constantes. La forma de estas entidades se codifica de modo expreso, es decir, permite modelar el espacio geográfico con primitivas geométricas como son puntos, líneas y polígonos, que contienen los elementos más destacados de la zona modelada (Olaya, 2014).

1.2 Modelo de datos ráster

El modelo ráster divide la zona de estudio de forma sistemática en una serie de unidades mínimas denominadas celdas, y para cada una de estas se recoge la información pertinente que la describe (Olaya, 2014).

En el modelo ráster, la división del espacio en unidades mínimas se lleva a cabo de acuerdo con algún patrón, de tal modo que existe una relación implícita entre las celdas, ya que estas son contiguas entre sí, cubren todo el espacio, y no se solapan (Olaya, 2014).

1.2.1 Modelo Digital de Elevación (*Digital Elevation Model – DEM*)

Un modelo digital de elevación (Figura 1) es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo (Durón, 2007). Se puede comprender como una representación matricial regular de la variación continua del relieve en el espacio (Olaya, 2014).

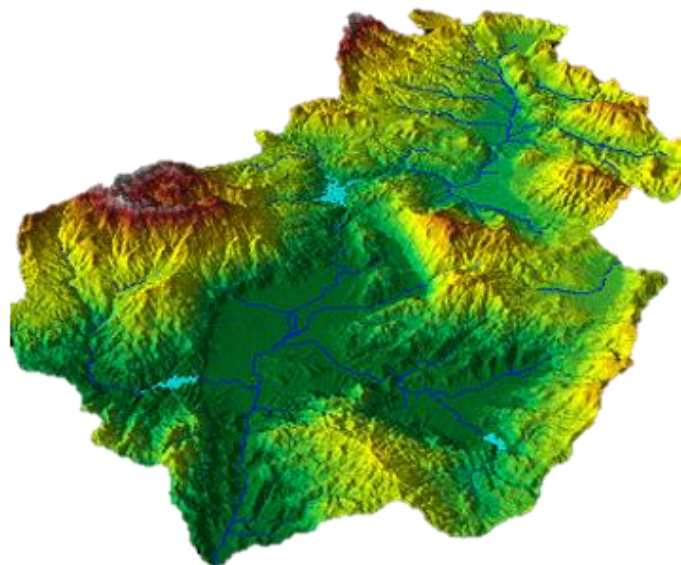


Figura 1: Ejemplo DEM

Fuente: (ESRI, 2016)

1.2.2 Imágenes satelitales Landsat

Landsat 5

Landsat 5 es un sensor de escaneo multiespectral creado para obtener imágenes de mediana resolución, sus datos se detectan en siete bandas espectrales (Tabla 1), posee los sensores “*Multispectral Scanner (MSS)*” y “*Thematic Mapper (TM)*”. La combinación de las bandas espectrales produce una gama de tonalidades e interpretaciones que aumentan considerablemente sus aplicaciones. En base al satélite y el sensor, se pueden incluir canales multiespectrales pancromáticos y térmicos (NASA, 2013a).

Tabla 1. Especificaciones de Landsat 5

Landsat 5	
Resolución espacial	30 metros
Resolución espacial infrarrojo térmico	120 metros
Rango espectral	0.45 – 12.5 μm
Número de bandas	7
Resolución temporal	16 días
Tamaño de imagen	185 km x 172 km

Fuente: (NASA, 2013a)

Landsat 7

Es una versión mejorada de los instrumentos Thematic Mapper que estaban a bordo del Landsat 4 y Landsat 5. Los productos Landsat 7 se presentan como imágenes de 8 bits con 256 niveles de gris (NASA, 2013b). Las principales especificaciones se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Especificaciones de Landsat 5 TM

Landsat 7	
Resolución espacial	30 metros
Resolución espacial banda térmica	60 metros
Rango espectral	0.45 – 12.5 μm
Número de bandas	8
Resolución temporal	16 días
Tamaño de imagen	185 km x 172 km

Fuente: (NASA, 2013b)

Landsat 8

El sensor OLI de Landsat 8 recopila datos de bandas espectrales infrarrojas, infrarrojas y de onda corta visibles, así como una banda pancromática, mientras que TIRS recopila datos para dos bandas espectrales más estrechas en la región térmica (Cepeda-Velastegui et al., 2019; NASA, 2013c). En la Tabla 3 se presentan las características técnicas de las imágenes Landsat 8 OLI.

Tabla 3. Especificaciones de Landsat 8 OLI

Landsat 8 OLI	
Resolución espacial (1-7,9)	30 metros
Resolución espacial pancromática (8)	15 metros
Rango espectral	0.435 – 12.51 μm
Número de bandas	11
Resolución temporal	16 días
Tamaño de imagen	185 km x 170 km

Fuente: (NASA, 2013c)

1.3 Clasificación de imágenes

La clasificación de imagen es el proceso en el cual se extraen clases de información de una imagen ráster multibanda. El ráster resultante de la clasificación de imagen se puede utilizar para crear mapas temáticos (ESRI, 2016).

La clasificación puede ser supervisada o no supervisada. En la Figura 2 se presenta el ejemplo de mapa de uso de suelo clasificado.

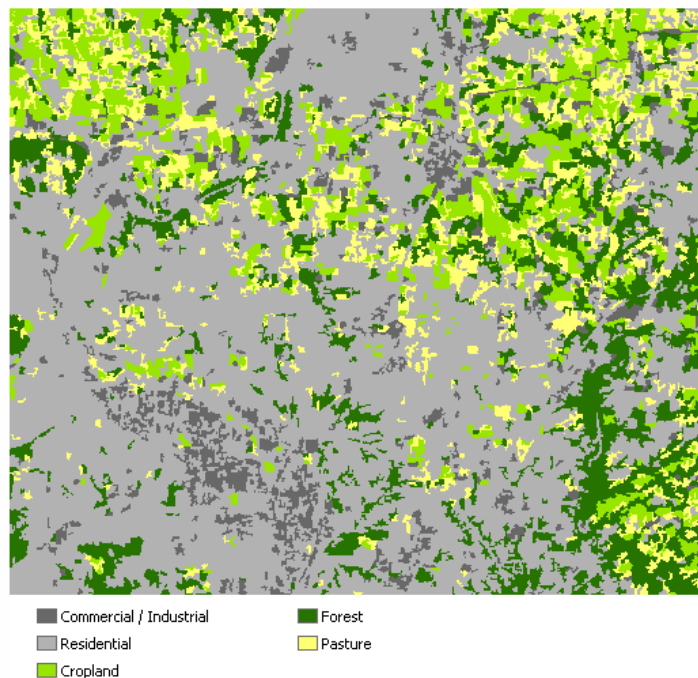


Figura 2. Mapa de usos del suelo clasificado de salida

Fuente: ESRI (2016)

1.3.1 Supervisada

La clasificación supervisada emplea firmas espectrales que se obtienen de las muestras de entrenamiento para clasificar un ráster (ESRI, 2016). Para ello, existe la intervención de un operador, quien debe introducir la firma espectral característica de las clases, es decir, identificar los valores más habituales que aparecen en la zona de estudio para cada una de las clases en mención (Olaya, 2014).

El proceso de clasificación supervisada (Figura 3) asigna a un punto a aquella clase, cuyo conjunto de valores típicos de las variables estudiadas son más similares a los presentes en dicho punto (Olaya, 2014).

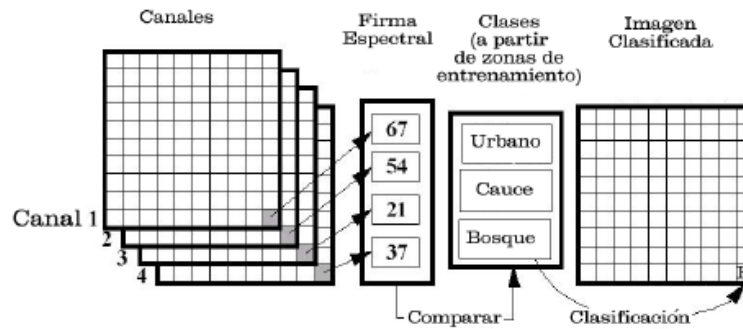


Figura 3. Proceso de clasificación supervisada

Fuente: Olaya (2010)

1.3.2 No supervisada

La clasificación no supervisada busca y determina clases espectrales (o clústeres) en una imagen multiespectral sin la intervención de un analista u operador (ESRI, 2016).

En este tipo de clasificación, el propio algoritmo define las clases de acuerdo con los datos. Para llevar cabo el proceso, es necesario suministrar algunos valores como el número de clases que se desea crear, los tamaños mínimos y máximos, mismos que guían al algoritmo en la definición de clases (Olaya, 2014).

1.4 Análisis espacial (geoespacial)

Es el estudio cuantitativo de los fenómenos que se producen en el espacio; conocido como un conjunto de técnicas y modelos que hacen uso de datos que se encuentran en el espacio. La posición, la superficie, la distancia y la interacción a través del propio espacio son factores clave. Para que estos conceptos cobren sentido, se necesita que toda la información este referenciada espacialmente (Olaya, 2014).

1.5 Autómatas celulares y el crecimiento urbano

Los autómatas celulares (AC) son estructuras ideales para la generación de modelos computacionales de sistemas dinámicos o complejos. El aspecto característico de los autómatas celulares es su capacidad para otorgar al conjunto de elementos del sistema en análisis, visto como una totalidad, con varias propiedades emergentes producidas por su propia dinámica (Fernández & Rangel, 2014)

Enfocados al análisis espacial, los AC dividen al espacio en celdas, donde el tiempo transcurre en periodos discretos; las celdas poseen un número finito de estados, y cada una de ellas está actualizada por reglas específicas y umbrales determinados (Ulloa-Espíndola & Pérez-Albert, 2022; Yeh et al., 2021).

En el contexto de crecimiento urbano, los investigadores han analizado los patrones de urbanización y sus factores impulsores, utilizando modelos geoespaciales y estadísticos, que incluyen modelos de regresión. Entre estos modelos establecidos, el modelo de autómatas celulares es el más popular, ya que es apropiado para simular el proceso de crecimiento urbano, que es totalmente de naturaleza local (Batty et al., 1999; Tripathy & Kumar, 2019) .

Los modelos basados AC permiten simular y predecir el cambio de uso del suelo y los patrones de crecimiento urbano futuros, y debido a su estructura abierta se puede integrar con otros modelos (Barredo et al., 2003; Batty, 2011); los modelo AC son sencillos de usar y puede simular patrones urbanos complejos.

El modelo autómatas celulares es un enfoque basado en reglas que trabaja en un nivel micro además de la flexibilidad de las reglas de transición que simplifican la simulación espacial, contribuyendo así a una mejor proyección del crecimiento urbano en comparación con los modelos matemáticos convencionales (Tripathy & Kumar, 2019).

A pesar de las ventajas, los modelos de autómatas celulares convencionales no son totalmente compatibles para crear simulaciones realistas de la dinámica urbana, por la simplicidad de la estructura (Aburas et al., 2016) . Por lo tanto, el modelo de AC tradicional debe ser modificado e integrado con sistemas cuantitativos para lograr mejores resultados, que se pueden lograr utilizando factores dinámicos y considerando reglas tanto espaciales como temporales (Aburas et al., 2016).

En este sentido, diversos trabajos han combinado los modelos de autómatas celulares con otras técnicas para obtener resultados óptimos. Una de las combinaciones más empleadas corresponde a AC - pendiente, uso de suelo, exclusión, expansión urbana, transporte y mapa de sombras (*SLEUTH – Slope, Landuse, Exclusion, Urban, Transportation and Hillshading*) (Aburas et al., 2016).

Es indispensable integrar al modelo diversas variables temáticas como uso del suelo/cobertura del suelo, elevación, pendiente, proximidad al transporte, distancia al CBD, distancia a ciudades de gran tamaño, entre otras (Gómez et al., 2021; Tripathy & Kumar, 2019), de esta forma el modelo de AC no solo estará influenciado por los estados vecinos, sino también una serie de restricciones ambientales, topográficas, de desarrollo, entre otras (Yeh et al., 2021).

1.6 El proceso histórico de urbanización de Cuenca

Cuenca inició su proceso urbano a partir del siglo XV cuando los incas anexaron a su imperio el territorio de la cultura Cañari; es desde allí, que poco a poco se construyeron los principales centros urbanos y el más conocido como Tomebamba, mismo que fue destruido por los conflictos internos (Carpio, 1976).

En el año de 1557, es fundada oficialmente la ciudad española como “Santa Ana de los Ríos de Cuenca”. Se crearon los trazados de las calles en la forma de damero y en base a los puntos cardinales (Carpio, 1976).

En el siglo XIX se logra la independencia de la Corona de España y en 1830 se establece la República del Ecuador, un hecho que es de alcance nacional y presenta importantes impactos a nivel local. No obstante, se observa que la ciudad no ha crecido o se ha modificado considerablemente, con respecto al siglo anterior, incluso presentó una disminución de población; según los historiadores, este suceso se lo vincula con la migración a la costa alentada por el empobrecimiento, hambrunas y la guerra (Carpio, 1976).

A partir del año 1950 existe una aceleración del crecimiento en población y en área urbanizada (Tabla 4), dada por la construcción de infraestructura vial, canalización, energía, agua potable entre otras. Este evento se relaciona principalmente con el fenómeno migratorio del campo a la ciudad; en ese entonces, el factor económico fue afectado por la caída del comercio de los sombreros de paja toquilla, por lo que la población se desplazó en busca de fuentes de empleo (V. Mejía, 2014).

Tabla 4. Evolución de población y área urbana de Cuenca

Año censal	Población	Año de límite urbano	Área bruta	Fuente de límite urbano
1950	39.983	1946	288,29	municipal
1962	60.402	1968	2.237,30	municipal
1974	104.470	1974	2.317,00	censal
1982	152.406	1982	2.674,99	censal
1990	194.981	1990	4.580,21	censal
2001	277.374	2001	6.395,99	censal
2010	329.928	2010	7.248,23	censal

Fuente: (Hermida et al., 2015b)

En la propuesta del Plan Regulador, realizado por el arquitecto Gatto Sobral en los años cincuenta, buscó planificar la ciudad para 50 años. El plan propuso diversos ejes viales y equipamientos de importancia, incluyendo el aeropuerto, mismo que ya fue inaugurado con 6 años de anterioridad al plan en mención (V. Mejía, 2014).

En los años 1982 a 1990, existe decrecimiento importante en la densidad, a pesar de que Plan de Desarrollo Urbano del Área Metropolitana de Cuenca que planteaba teóricamente, el control del crecimiento y promoción del uso del uso vacante (Hermida et al., 2015b); a través de este, se estableció la configuración de la ciudad mediante datos de población, infraestructura, equipamientos, y formuló el sistema de catastro de la propiedad urbana, logrando una visión mucho más real del territorio. Se propusieron las áreas: metropolitana, periférica y de actuación especial. En 1995, se realiza una reforma a este plan, debido a que la población creció más rápido de lo esperado, y se planteó la ampliación del límite urbano y la definición del área de expansión (V. Mejía, 2014)

En el año 1998, se emite la Ordenanza que Sanciona el Plan de Ordenamiento Territorial del cantón Cuenca, que planteó el límite urbano y la normativa para construcción, alentada por las tendencias mundiales de buscar el desarrollo sustentable, que apuntaba a la compactación de las ciudades, conservación de los ecosistemas y enfatizaban los impactos negativos de un modelo de desarrollo urbano disperso (Hermida et al., 2015b)

En 2003, se realiza una nueva reforma, con un cambio de paradigma, puesto que ahora se propone densificar áreas con el fin de aprovechar infraestructuras ya existentes. Además, se delimitaron zonas con grados de urbanización denominados sectores rurales con tendencia a la conformación de núcleos de población (V. Mejía, 2014) .

En 2011 se planteó el Plan de desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Cuenca, donde no existe un cambio de limite urbano, pero se proponen planes parciales para áreas urbanas que se encuentran en el área de influencia urbana (V. Mejía, 2014).

En 2012 se emitió la Ordenanza de Aprobación del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) para Cuenca y finalmente se aprueba el Plan de Ordenamiento Urbano en 2015 (Hermida et al., 2015b).

Actualmente, el Plan de Uso y Gestión del Suelo (PUGS) del cantón Cuenca se encuentra en proceso socialización a través de mesas técnicas con los múltiples actores de la planificación urbana.

1.7 Estudios locales del crecimiento urbano de Cuenca

Según Hermida et al. (2015) la ciudad de Cuenca fue compacta con alta calidad de vida, pero con el pasar de los años ha ido presentado tendencias de dispersión, con la ausencia de planificación y densificación.

La densidad urbana es una de las variables clave que permite establecer patrones sobre el crecimiento de la ciudad. En el caso de Cuenca, para el año 1950 la densidad bruta fue de 138,69 hab/ha, donde se evidencia la organización compacta de la ciudad. Para los años setenta la densidad bruta corresponde a 27 hab/ha, lo que indica una disminución de la densidad en cinco veces respecto al dato de 1950. En 1974 y 1982, presentan una densidad bruta de 45,06 hab/ha y 56,97 hab/ha respectivamente, indicando una ligera consolidación (Hermida et al., 2015b).

En el artículo “Evaluando la sustentabilidad de la densificación urbana. Indicadores para el caso de Cuenca (Ecuador)” de Cabrera-Jara et al (2015), se presenta un sistema de indicadores que permiten analizar la complejidad de la ciudad y logran mostrar la dimensión espacial. Para el caso de los indicadores que se refieren a densidad y ocupación, se evidenció una baja densidad con un porcentaje significativo de predios vacíos (Cabrera-Jara et al., 2015).

Según el análisis de (R. Mejía, 2020) se evidencia que la densidad de unidades residenciales, en base a los medidores eléctricos, sobrepasa el límite urbano y límite de expansión urbana determinados para el cantón Cuenca, lo cual reafirma la gran expansión urbana que presenta la ciudad y el desfase entre la realidad territorial y la planificación.

CAPÍTULO 2. MARCO METODOLÓGICO

2.1 Área de estudio

El cantón Cuenca se encuentra en la provincia del Azuay, está organizada por 15 parroquias urbanas y 21 parroquias rurales (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del cantón Cuenca, 2015) . El cantón Cuenca posee un área total aproximada de 319.416,63 ha, de las cuales 7.171,79 ha corresponden a zona urbana y 1.663,16 ha de las zonas urbano-parroquiales, coberturas que se encuentran clasificadas como “suelo urbano” según la delimitación actual de Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del cantón Cuenca.

En la circunscripción del cantón Cuenca, existen áreas naturales protegidas como son el Parque Nacional Cajas, bosques protectores y humedales (Figura 4).

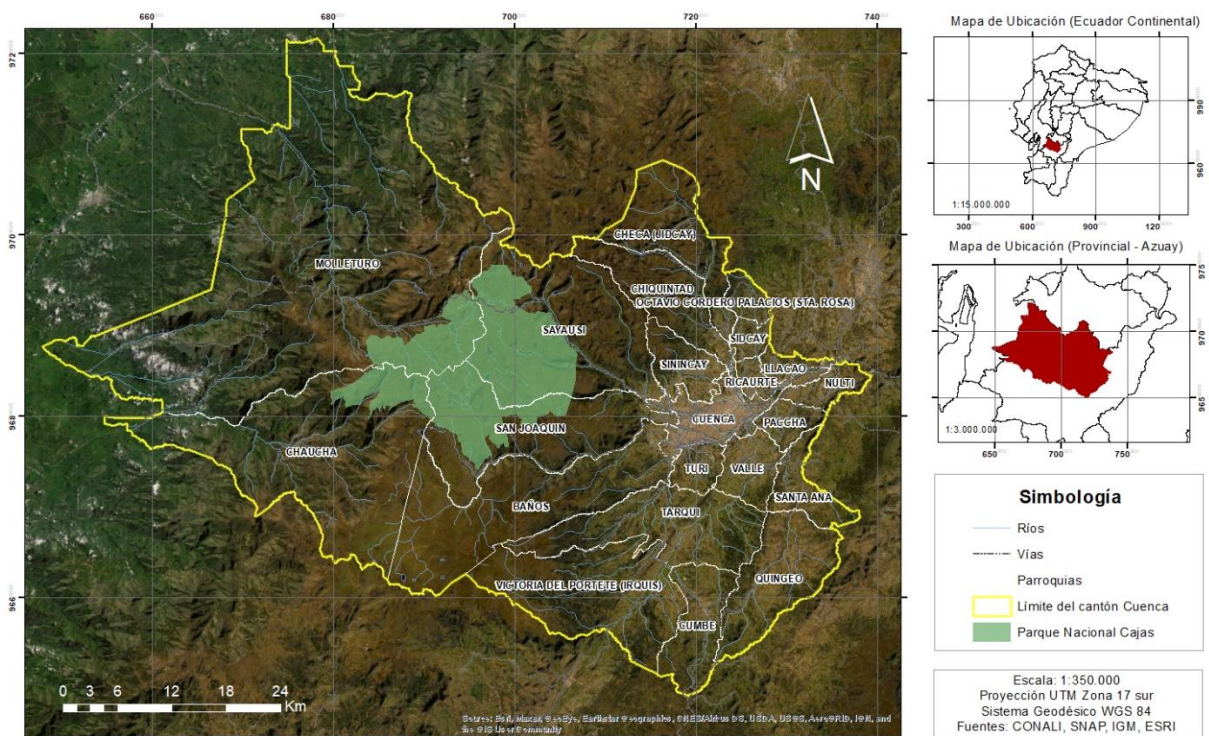


Figura 4. Mapa de ubicación del cantón Cuenca

Fuente: Elaboración propia

La presente investigación se enfocará en la zona de mayor dinámica urbana, como son la ciudad de Cuenca y las principales áreas urbano-parroquiales.

A continuación, se presenta la delimitación del área de estudio que se denominará AOI (*Area of interest*) a lo largo del documento (Figura 5).

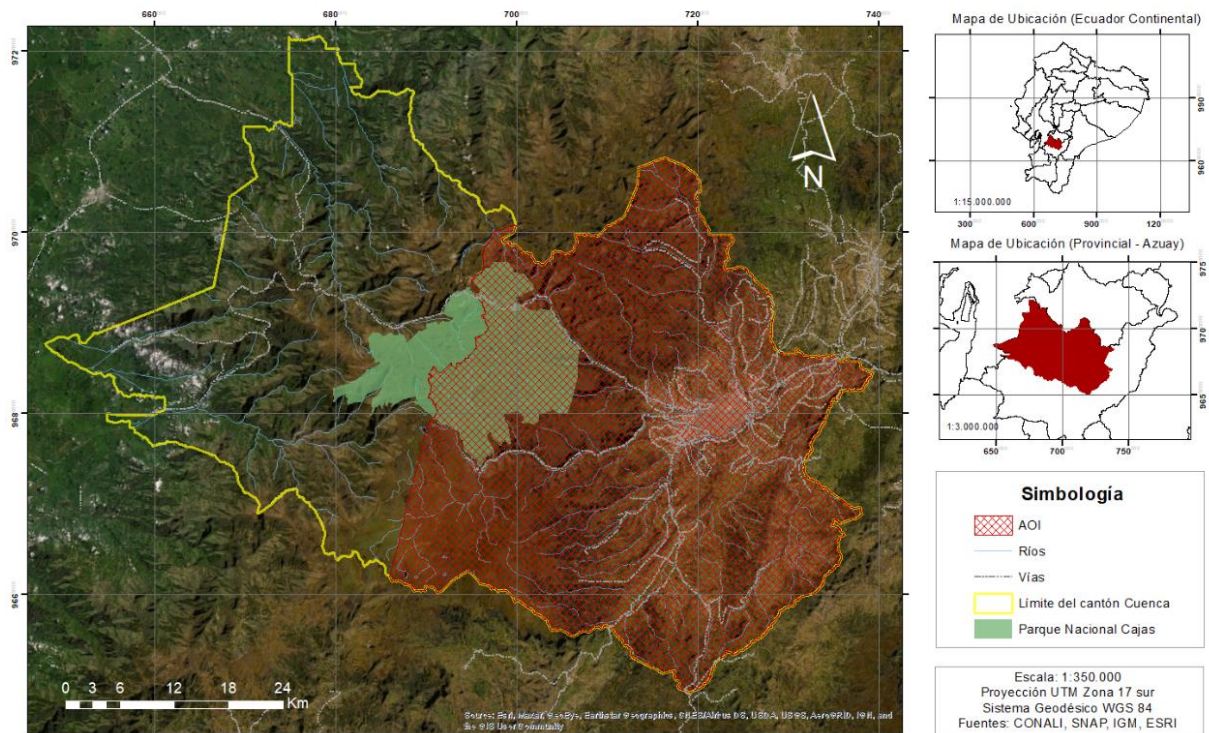


Figura 5. Definición del área de estudio

Fuente: Elaboración propia

2.2 Recopilación de insumos base

La investigación integra múltiples tipos de datos: ráster, vectorial y alfanuméricos, mismos que fueron obtenidos de varios repositorios y bases de datos de las instituciones y/o dependencias correspondientes (Tabla 5).

Se emplearon imágenes satelitales multiespectrales Landsat 5, 7 y 8, datos de los censos de Ecuador, Modelo Digital de Elevación (*DEM*), red vial, cobertura del Sistema Nacional de Áreas Protegidas, límite del cantón y centro de negocios.

Tabla 5. Detalles de los insumos base

Nombre	Detalle	Fecha de adquisición	Fuente	Tipo de dato
Landsat 5 TM	Path: 010, Row: 062 Resolución espacial: 30 m	1989 1998	USGS	Ráster
Landsat 7 ETM	Path: 010, Row: 062 Resolución espacial: 30 m	2007	USGS	Ráster
Landsat 8 OLI	Path: 010, Row: 062 Resolución espacial: 30 m	2016	USGS	Ráster
Modelo Digital de Elevación (DEM)	SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 1 Arc-Second Global Resolución espacial: 30 m	***	USGS	Ráster
Censo de población	Censo de 1990,2001,2010 Población 2020 Proyección de 2030	1990 2001 2010 2020 2030	INEC y PDOT 2015	Alfanumérico
Vías	Vías de primer y segundo orden	***	IGM	Vector
Parque Nacional Cajas	Sistema Nacional de Áreas Protegidas	***	Ministerio del Ambiente - SNAP	Vector
Límite del cantón Cuenca	Límite cantonal	2017	CONALI	Vector
Parroquias del cantón Cuenca	Límite parroquial	2017	CONALI	Vector

Fuente: Elaboración propia

Las imágenes satelitales multiespectrales son productos de sensores remotos que se constituyen en insumos para la obtención del uso de suelo de los años en análisis. Se obtuvieron imágenes satelitales Landsat 5,7 y 8, a través de la plataforma *Earth Explorer* del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) de forma gratuita. El Modelo Digital de Elevación (*DEM*) se obtuvo de la misma plataforma del set de datos de SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) 1 Arc-Second Global.

Los censos de población de los años 1990, 2001 y 2010 se obtuvieron de la página del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC); el tipo de dato corresponde a alfanumérico y a nivel de parroquia. La proyección de población de 2020 y 2030 se obtuvo del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Cuenca de 2015, en representación alfanumérica.

La red vial se obtuvo del geoportal del Instituto Geográfico Militar, en donde se recalcan las vías de primer y segundo orden. La información de áreas protegidas fue recopilada a través del Ministerio del Ambiente. El límite cantonal y parroquial fue obtenido del Comité Nacional de Límites Internos (CONALI). Las variables de red vial, áreas protegidas y límites corresponden a información vectorial.

2.3 Depuración y tratamiento de insumos base

Los datos e insumos pasaron por un proceso de depuración y tratamiento. Para la información alfanumérica se realizó un proceso de espacialización, por medio de la vinculación de la información parroquial (de tipo vectorial que se encuentra geoposicionada) con los datos registrados en los censos y proyecciones de población.

Se ejecutaron múltiples geoprocесamientos con el objetivo de establecer que la totalidad de variables se presenten en tipo ráster. A través de la normalización de los insumos, el modelo de autómatas celulares pudo integrar los patrones de crecimiento urbano.

2.3.1 Imágenes Satelitales Landsat

Las bandas de las imágenes Landsat 5 y 8 fueron sometidas a un proceso de unión (*composite bands*) y posteriormente a la delimitación en base al AOI.

En el caso de la imagen Landsat 7 se realizó un procesamiento adicional debido a la existencia de espacios (*gaps*) sin información en la escena debido a errores en el sensor (Figura 6. (a)). Para cada una de las bandas de la imagen multiespectral, se realizó la unión con la información de “*gap_mask*” (Figura 6. (b)), disponible en la carpeta de la imagen satelital, y como paso subsiguiente se empleó la caja de herramientas *Landsat Toolbox*, opción *Fix Landsat 7 Scanline Errors*, para corregir el bandeo (Figura 6 (c)).

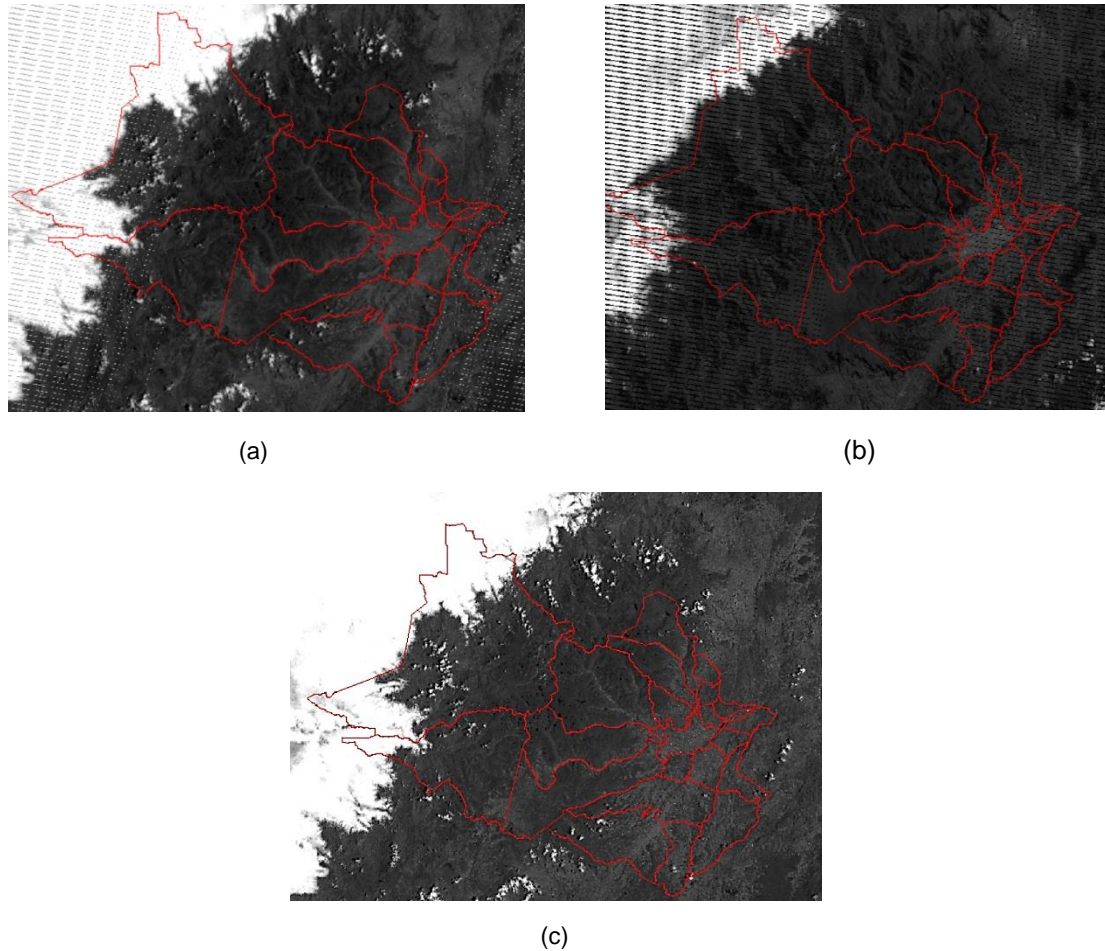


Figura 6. (a) Imagen Landsat 7 (banda B1) con gaps, (b) Imagen Landsat 7 (banda B1) e información de gap mask unida, (c) Imagen Landsat 7 (banda B1) corregida

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se procedió a unir todas las bandas para obtener la imagen multiespectral y realizar el respectivo recorte con el AOI.

2.3.2 Modelo Digital de Elevación (DEM)

El Modelo Digital de Elevación de *SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 1 Arc-Second Global*, que fue obtenido de forma gratuita y con resolución espacial de 30 metros. El insumo presentaba teselas sin información (*gaps*) (Figura 7), para lo cual se realizaron varios procesos para obtener un insumo en óptimas condiciones.

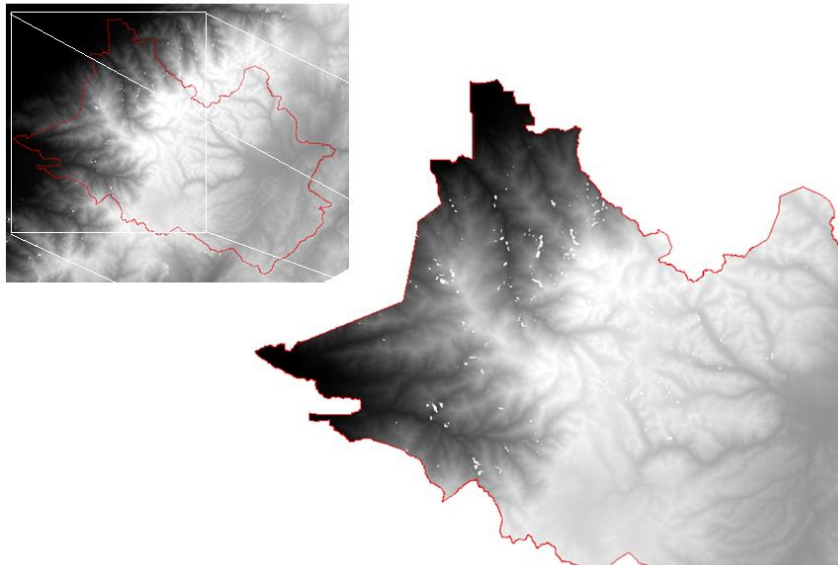


Figura 7. DEM con gaps

Fuente: Elaboración propia

Se identificaron los gaps mediante la calculadora ráster y la función “*IsNull*” (Figura 8).

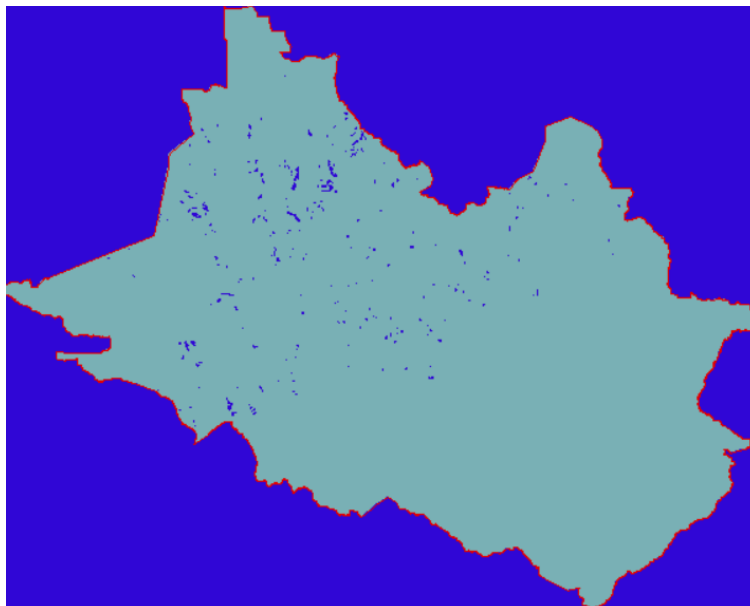


Figura 8. Identificación de gaps en el DEM

Fuente: Elaboración propia

Se realizó la corrección del *DEM* a través de la función “*FocalStatistics*”, misma que permitió obtener los valores faltantes en base a operaciones de vecindad (Figura 9).

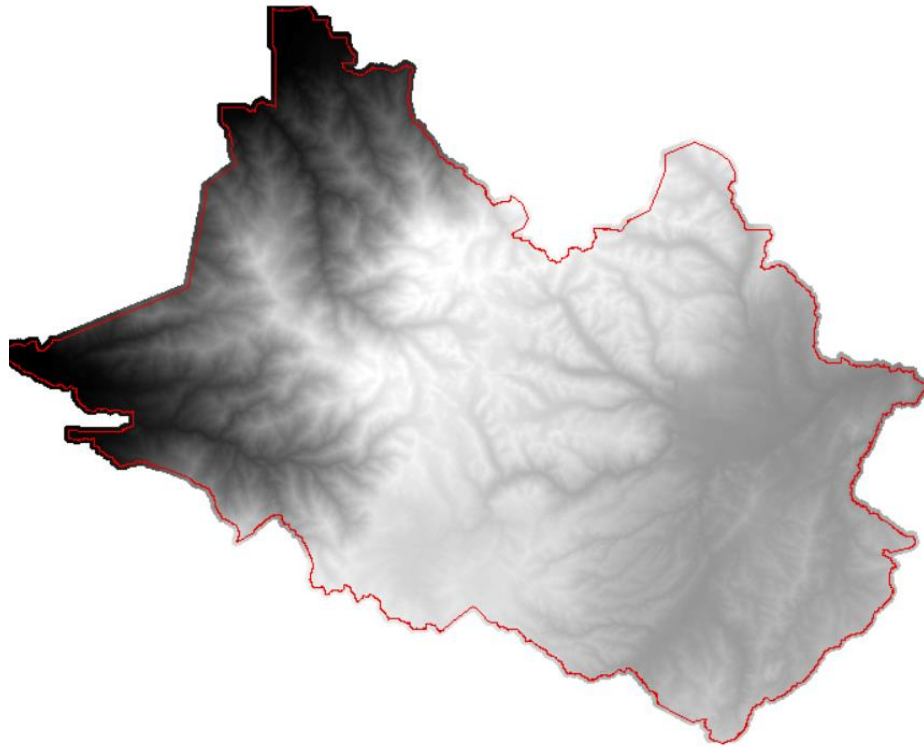


Figura 9. DEM corregido

Fuente: Elaboración propia

2.3.3 Tratamiento de variables/factores de crecimiento urbano

Población

Los datos censales a nivel parroquial de los años 1990, 2001, 2010 y proyecciones de 2020 y 2030 fueron espacializados mediante su integración con el *shape* de parroquias del cantón Cuenca. A través de la información de población y el área de cada parroquia se obtuvo la densidad poblacional.

Vías

Se realizó un *buffer* a las vías de primer y segundo orden, a través de anillos de intervalos de 500 m.

Parque Nacional Cajas

Se realizó la extracción del Parque Nacional del Parque Nacional Cajas del *shape* del Sistema Nacional de Áreas Protegidas, mismo que corresponde a un área restringida y en esa zona no se podrán generar procesos de urbanización.

Centro de negocios

El centro de negocios del área de estudio corresponde a la ciudad de Cuenca y para ello se realizó un *buffer*, como centroide el parque Calderón y anillos con intervalo de 5 km.

Pendiente

Se aplicó la herramienta *Slope* al Modelo Digital de Elevación para obtener los valores de pendiente del área de estudio.

2.3.4 Clasificación de imágenes satelitales multiespectrales Landsat 5,7 y 8

Se llevó a cabo un proceso de clasificación supervisada para la obtención del uso de suelo de las imágenes satelitales multiespectrales Landsat 5,7 y 8, en los años: 1989, 1998, 2007 y 2016.

Se definieron las clases de uso/cobertura de suelo construido, vegetación, agua y otro; en la Tabla 4 se presenta la descripción de cada una de ellas.

Tabla 6. Clasificación de uso/cobertura de suelo

Clase	Descripción
Construido	Suelo con estructuras de origen antrópico, incluidas las áreas residenciales, áreas comerciales, mixtas, vías de transporte, infraestructuras.
Vegetación	Todos los espacios verdes, incluyendo tierras agrícolas, parques, plantaciones, bosques protegidos, agricultura.
Agua	Todos los cuerpos de agua, incluidos aguas superficiales, lagos, lagunas, embalses, estanques, ríos.
Otro	Terrenos baldíos, suelo desnudo, áreas arenosas, afloramientos rocosos, etc.

Fuente: Elaboración propia

Se realizó la clasificación supervisada a través de toma de muestras de las clases definidas sobre las imágenes satelitales multiespectrales de los años en análisis. A continuación, se procedió a crear las firmas espectrales de cada imagen satelital. Se procesó las imágenes mediante su conjunto de bandas y firmas espectrales, dando como resultado un ráster clasificado como se muestra en la Figura 10.

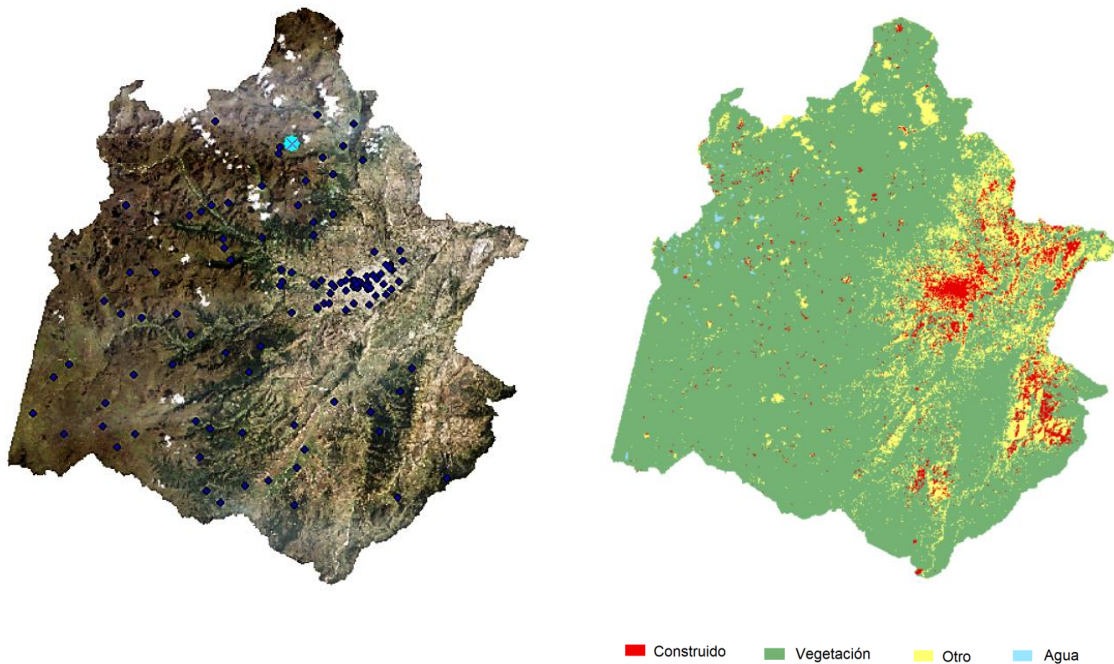


Figura 10. Clasificación de imagen satelital multiespectral (1989)

Fuente: Elaboración propia

2.4 Modelo autómatas celulares y simulación

El modelo de autómatas celulares se basó en el *script* desarrollado por Tripathy (2018), que se encuentra diseñado para simular el crecimiento urbano utilizando datos de cobertura del suelo, parámetros que impulsan el crecimiento urbano y el modelo de Autómatas Celulares. El lenguaje de programación corresponde a Python.

Se emplearon e importaron las librerías *os*, *math*, *numpy* y *gdal*, mismas que permitieron el uso de funciones para los diversos procesos que requiere el modelamiento.

Se definieron las funciones de lectura de los archivos ráster para generar una matriz y fuentes de datos. Se verificó que todos los insumos de entrada en dos periodos de tiempo tengan el mismo tamaño de celda (30 m), número de filas (1972), número de columnas (1780) y cuatro clases (en el caso de los rústers clasificados).

Se determinaron los parámetros de crecimiento (población, red vial, centro de negocios, áreas protegidas y pendiente) y sus umbrales, mismos que fueron calibrados a través de iteraciones, en base a la precisión espacial de los valores obtenido.

Se realizó el proceso de exportación de los ráster de los años 1997, 2007, 2016 y 2025. Finalmente, se realizó la comparación de área construida real y simuladas.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los factores de crecimiento urbano (centro de negocios, área protegida, red vial, pendiente, densidad) fueron procesados y normalizados. Se obtuvieron las imágenes clasificadas de los años 1989, 1998, 2007 y 2016. Se realizó la calibración del modelo de autómatas celulares y se realizaron las simulaciones. A continuación, se detallan los resultados obtenidos de los geoprocесamientos y modelamiento espacial mediante autómatas celulares.

3.1 Tratamiento de variables/factores de crecimiento urbano

3.1.1 Proximidad a centro de negocios

El centro de negocios de Cuenca se sitúa en el Parque Calderón, donde existe diversos tipos de servicios y actividades en los que se concentra la dinámica económica y social de la ciudad. Este factor, conjuntamente con la proximidad a la red vial, busca rastrear el crecimiento y su patrón direccional. La distancia al centro de negocios influyó principalmente en el crecimiento urbano de la zona central, y su efecto disminuyó a medida que aumentaba la distancia ((Figura 11 (a)).

3.1.2 Áreas protegidas (restricción de urbanización)

El parque Nacional Cajas es un área de protección y por ende posee una restricción de urbanización (Figura 11 (b)). Se entrenó al modelo para que no se generen píxeles de suelo construido en el área del parque.

3.1.3 Proximidad a vías principales

El ráster obtenido de la red vial apunta a una densidad de carreteras muy alta en las partes centrales de la ciudad de Cuenca y menor densidad en el noroeste y suroeste de la zona de estudio. En su mayoría el área de interés posee una densidad vial moderada a alta (Figura 11 (c)). Teniendo en cuenta el papel de las vías principales en el proceso de urbanización, se priorizó el crecimiento de las áreas más cercanas a las vías debido a su alta accesibilidad

3.1.4 Pendientes

El análisis indica que la elevación del área de estudio de oscila entre 2.299 y 4413 m.s.n.m. La ráster muestra pendientes bajas en la zona central de la ciudad de Cuenca, mientras que en la zona oeste se evidencia una topografía irregular con pendientes pronunciadas (Figura 11 (d)), debido a la presencia del Parque Nacional Cajas que se ubicada en la cordilla Occidental de los Andes (Astudillo et al., 2015). La pendiente es un factor indispensable en el crecimiento urbano, puesto que en zonas más elevadas disminuye la posibilidad de construcción debido a que su condición topográfica induce a deslizamientos y escorrentía (Arias et al., 2015; Tripathy & Kumar, 2019). Las bajas pendientes proporcionan mayor estabilidad y factibilidad constructiva, mismas que fueron privilegiadas para el crecimiento urbano como es el caso del área del casco urbano de la ciudad de Cuenca.

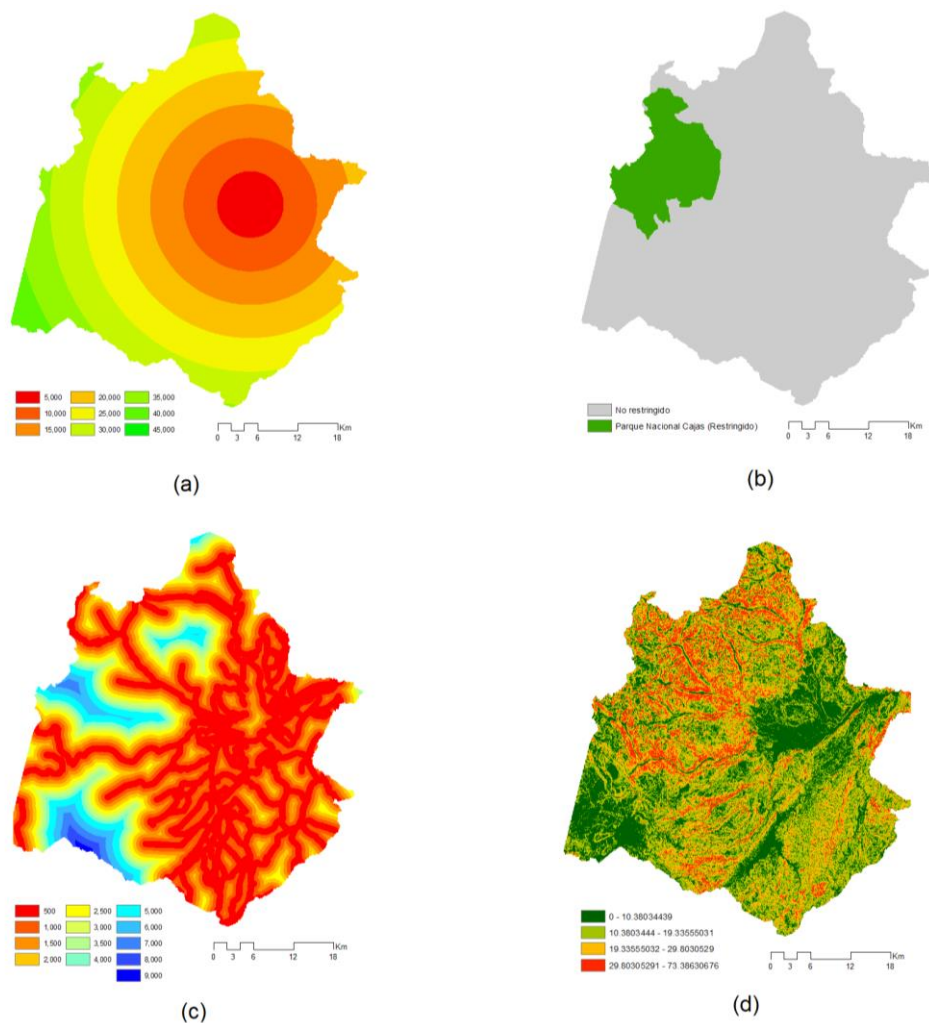


Figura 11. Ráster variables/factores de crecimiento urbano
Fuente: Elaboración propia

3.1.5 Densidad de población

La información alfanumérica disponible de los censos del Instituto Nacional de Estadística y Censos y los datos del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) fueron espacializados. Se generaron los ráster de 1990, 2001, 2010, 2020 y 2030 (Figura 12). En la ciudad de Cuenca y parroquias urbanas la densidad poblacional es muy alta y este patrón se mantiene en el transcurso del tiempo. Por otra parte, en las parroquias colindantes como Sinincay, Ricaurte, Paccha, Valle, Turi y Sidcay presentan una densidad que varía entre alta y moderada en los años de análisis. En el noroeste y suroeste se identificó una densidad baja y muy baja constante en el tiempo.

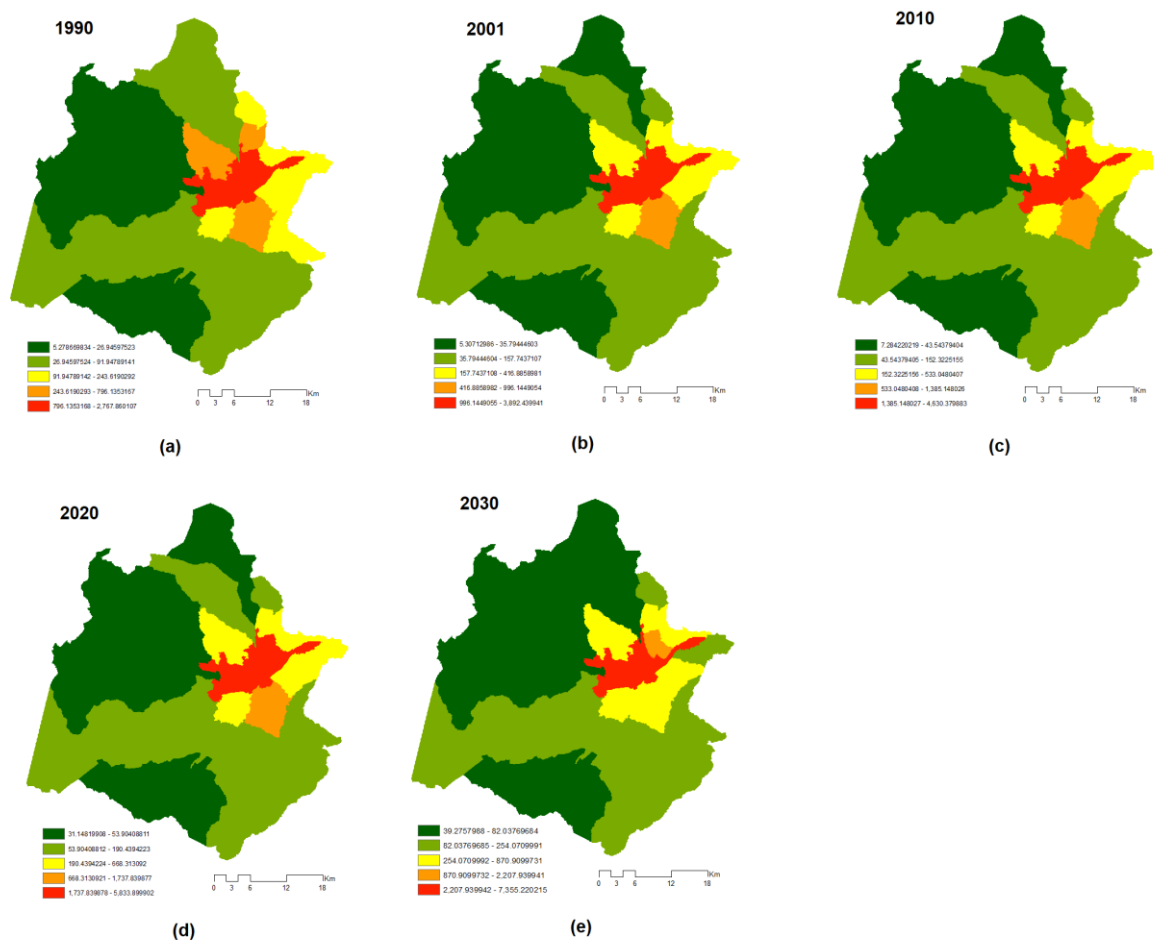


Figura 12. Ráster variables/factores de densidad de población
Fuente: Elaboración propia

3.2 Simulaciones

Se obtuvieron las simulaciones de los años 1998, 2007 y 2016 (Figura 13). La concentración de suelo construido se sitúa en la zona de la ciudad de Cuenca, sin embargo, a través del tiempo se puede observar un incremento elevado de urbanización en la zona sureste del área de estudio, donde se ubican las parroquias rurales de Turi, Valle, Paccha, Santa Ana, Tarqui, Cumbe y Quingeo.

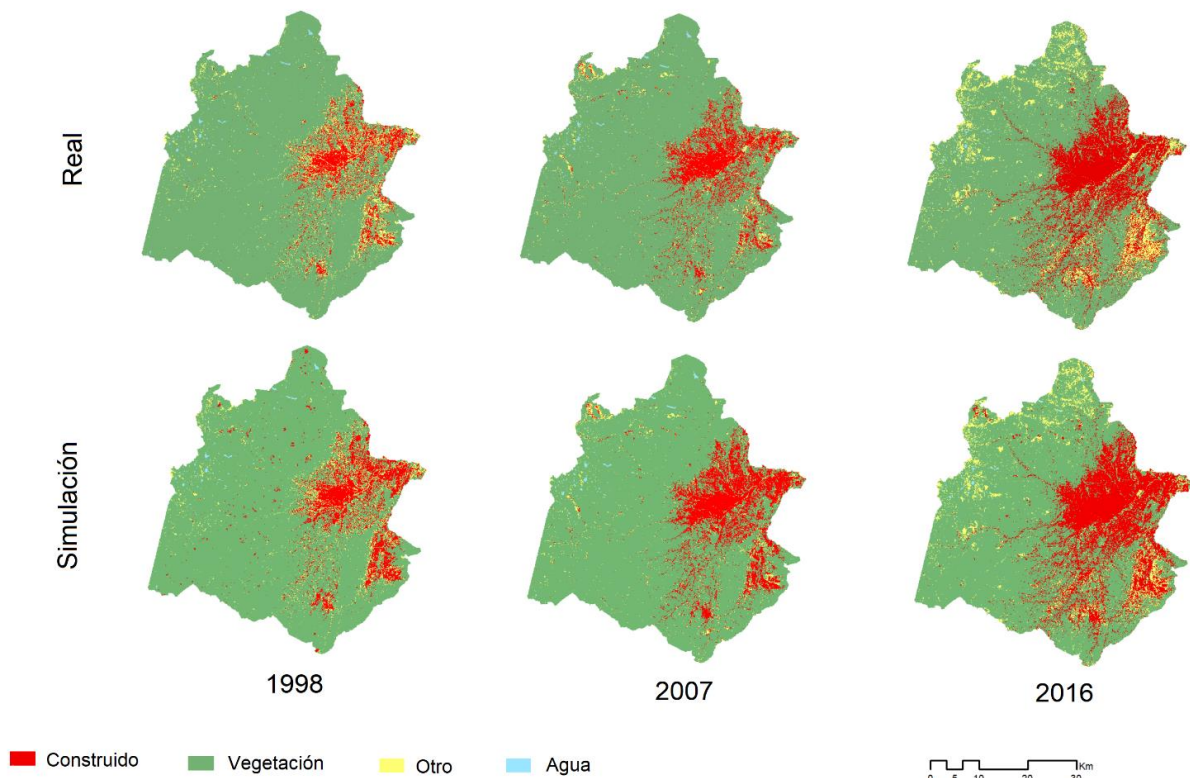


Figura 13. Ráster reales y simulación de 1998, 2007 y 2016
Fuente: Elaboración propia

Se identificó que el suelo construido real (en base a la clasificación de las imágenes satelitales) se incrementó de 124 km² a 225 km², durante 1998 a 2016 respectivamente (Tabla 7).

El porcentaje precisión espacial de suelo construido fue calculado con relación a la ubicación espacial de los ráster clasificados y los simulados de los periodos 1989-1998, 1998-2007 y 2007-2016.

En la primera entrada (año 1998) el porcentaje de precisión espacial corresponde a 59,69, con una diferencia de -11 km² entre el valor real de suelo construido y el simulado (Tabla 7).

La simulación para el año 2007 tuvo una precisión espacial de 67,12 % y una diferencia de -5 km² entre el valor real de suelo construido y el simulado (Tabla 7).

El resultado de precisión espacial de la simulación del año 2016 fue de 84,93 % y la diferencia entre el valor real de suelo construido y el simulado fue de 14 km² (Tabla 7).

Tabla 7. Resultados de simulación con el modelo de autómatas celulares

Año	Áreas construidas reales (km²)	Áreas construidas simuladas (km²)	Δ Diferencia	Precisión espacial (%)
1998	124	113	-11	59,69
2007	131	126	-5	67,12
2016	225	239	14	84,93
2025	***	334	***	***

Fuente: Elaboración propia

La simulación para el año 2025 se muestra en la Figura 14, se prevé 334 km² de área edificada (Tabla 7). La predicción indica un incremento de suelo construido en las zona norte y sur del núcleo urbano, sin embargo, existe predominancia de dispersión en la zona sureste del área de estudio.

Se identificaron pixeles de clasificación de suelo construido junto a las vías cercanas al Parque Nacional Cajas. Este aspecto es trascendental ya que la construcción de infraestructura urbana o franjas pobladas pueden generar múltiples impactos como: la fragmentación del ecosistema del área protegida, alteraciones hidrológicas, variaciones micro climáticas, presencia de material particulado, contaminación por ruido, disminución de poblaciones de especies de flora y fauna endémica, entre otros (Arroyave et al., 2006).

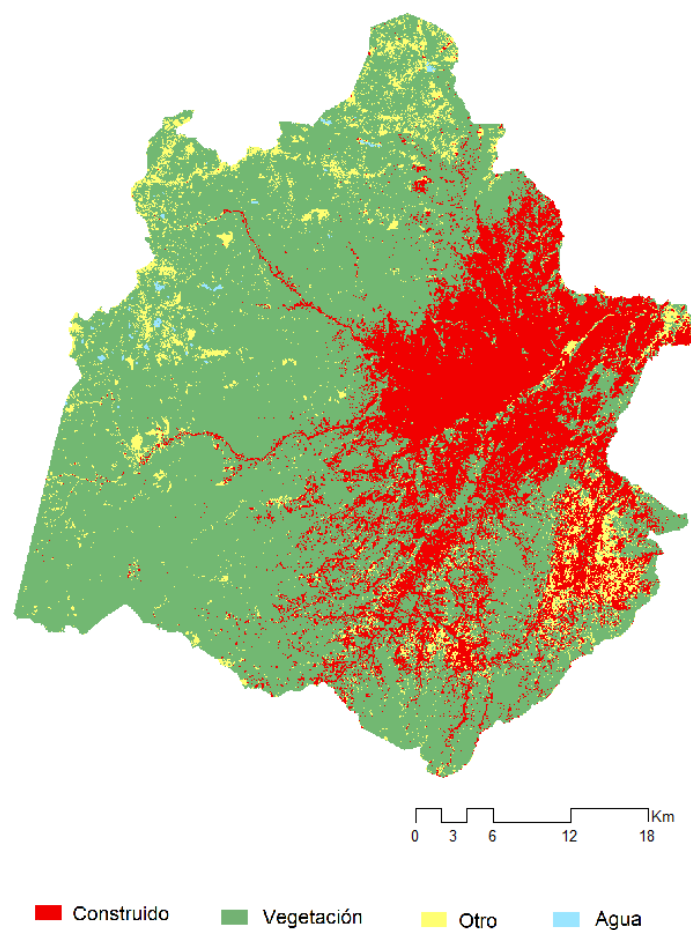


Figura 14. Ráster de simulación de crecimiento urbano para 2025
Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

La integración de productos de sensores remotos, análisis geoespacial y aplicación del modelo de autómatas celulares permitió replicar cuantitativamente el proceso de crecimiento urbano del área de estudio.

La influencia de cercanía a centro de negocios (centro de la ciudad de Cuenca – Parque Calderón), proximidad a vías, pendientes bajas y alta densidad de población evidenció la concentración de suelo construido, lo que indica la importancia de la introducción de estos factores en el modelo de autómatas celulares para reflejar los aspectos económicos, sociales, ambientales y topográficos de la zona de interés.

El porcentaje precisión espacial del modelo aumentó en cada interacción llegando a una precisión de 84,93% considerada moderadamente alta.

La tendencia de crecimiento urbano en la zona suroeste del área de estudio (principalmente las parroquias rurales Valle, Turi, Tarqui, Victoria del Portete, Cumbe, Quingeo, Santa Ana, Paccha) presenta un modelo disperso.

El resultado de la simulación para 2025 prevé la presencia de franjas de suelo construido alrededor de las vías cercanas al Parque Nacional Cajas, mismo que se encuentra ubicado en la circunscripción de las parroquias rurales Sayausí y San Joaquín. Se deben generar políticas públicas que garanticen la conservación del Cajas, y se considere los impactos que produce la dinámica de urbanización en zonas pobladas y vías aledañas.

Es indispensable que la planificación urbana se realice en base a estudios de la realidad espacial del territorio. Se deben emplear insumos geoespaciales actualizados y estudios técnicos para que la planificación de las ciudades ecuatorianas se transforme de descriptiva tardía a prospectiva (*del latín prospectivus mirar hacia adelante*).

RECOMENDACIONES

Se recomienda emplear mayor cantidad de información (garantizando la calidad de los datos) para obtener múltiples entradas en diversos intervalos de tiempo; de esta forma el modelo tendrá varias iteraciones con los ráster clasificados y los factores que favorecen el crecimiento urbano de la zona de estudio y logrará una mejor calibración para las simulaciones.

Se recomienda incorporar patrones de crecimiento urbano como datos población, red vial, centro de negocios, áreas protegidas (restricción de urbanización) y pendientes para lograr que el modelo no solo considere los pixeles vecinos para las predicciones.

BIBLIOGRAFÍA

- Aburas, M. M., Ho, Y. M., Ramli, M. F., & Ash'aari, Z. H. (2016). The simulation and prediction of spatio-temporal urban growth trends using cellular automata models: A review. In *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* (Vol. 52, pp. 380–389). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.07.007>
- Allen, J., & Lu, K. (2003). Modeling and Prediction of Future Urban Growth in the Charleston Region of South Carolina: a GIS-based Integrated Approach. In *Ecology* (Vol. 8, Issue 2). <https://www.jstor.org/stable/26271983>
- Álvarez, A., & Serrano, J. (2010). *CUENCA: SU CRECIMIENTO URBANO Y PAISAJÍSTICO DESDE 1950-2008*.
- Arias, J., Cuenca, S., & Maita, P. (2015). *Asentamientos informales: Reubicación, diseño y anteproyecto de las viviendas ubicadas en la quebrada del Milchichig de la ciudad de Cuenca*.
- Arroyave, M., Gómez, C., Gutiérrez, M., Múnera, D., Zapata, P., Vergara, I., Andrade, L., & Ramos, K. (2006). Impactos de las carreteras sobre la fauna silvestre y sus principales medidas de manejo. *Revista EIA*, 5, 45–57. <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=149216902003>
- Astudillo, P., Tinoco, B., & Siddons, D. (2015). The avifauna of Cajas National Park and Mazán Reserve, southern Ecuador, with notes on new records. *Contiga* 37, 2–12. <https://www.researchgate.net/publication/282250117>
- Avalos Jiménez, 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), 021. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201938.018>
- Barredo, J. I., Kasanko, M., McCormick, N., & Lavalle, C. (2003). Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata. *Landscape and Urban Planning*, 64, 145–160. <http://moland.jrc.it>
- Batty, M. (2011). Modeling and simulation in geographic information science: Integrated models and grand challenges. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 21, 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.07.003>
- Batty, M., Xie, Y., & Sun, Z. (1999). Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata. *Computers, Environment and Urban Systems*, 23, 205–233.
- Bhatta, B. (2009). Analysis of urban growth pattern using remote sensing and GIS: A case study of Kolkata, India. *International Journal of Remote Sensing*, 30(18), 4733–4746. <https://doi.org/10.1080/01431160802651967>
- Cabrera-Jara, N. E., Orellana-Vintimilla, D. A., Hermida-Palacios, M. A., & Osorio-Guerrero, P. E. (2015). Evaluando la sustentabilidad de la densificación urbana. Indicadores para el caso de cuenca (Ecuador). *Bitácora Urbano Territorial*, 25(2), 21–34. <https://doi.org/10.15446/bitacora.v2n25.49014>
- Carpio, J. (1976). Las etapas de crecimiento de la ciudad de Cuenca, Ecuador. *Revista Geográfica*, 77–101.
- Cepeda-Velastegui, M. V., Lopez Estevez, M. C., Padilla-Almeida, O., & Toulkeridis, T. (2019). Determination of open pit mining zones through digital processing of multi-spectral images and ppi method - A case study of southern Ecuador. *2019 6th International Conference on EDemocracy and EGovernment, ICEDEG 2019*. <https://doi.org/10.1109/ICEDEG.2019.8734455>
- Chackiel, Juan., UN. ECLAC., & Latin American Demographic Centre. Population Division. (2004). *La dinámica demográfica en América Latina*. Naciones

- Unidas, CEPAL, CELADE, División de Población.
- Chen, S., Zeng, S., & Xie, C. (2000). Remote Sensing and GIS for Urban Growth Analysis in China. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66(5), 593–598.
- de Almeida, C. M., Vieira Monteiro, A. M., Câmara, G., Soares-Filho, B. S., Coutinho Cerqueira, G., Lopes Pennachin, C., & Batty, M. (2005). GIS and remote sensing as tools for the simulation of urban land-use change. *International Journal of Remote Sensing*, 26(4), 759–774.
<https://doi.org/10.1080/01431160512331316865>
- Durón, J. (2007). *Modelos Digitales De Elevación Para El Continuo De Elevaciones Mexicano*.
<http://mapserver.inegi.org.mx/eventos/cng2007/cng2007/extcemjavierduron.pdf>
- ESRI. (2016). *¿Qué es la clasificación de imagen?*
<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/guide-books/extensions/spatial-analyst/image-classification/what-is-image-classification-.htm>
- Fernández, S., & Rangel, J. (2014). Autómatas Celulares y su Aplicación en Computación. *VIII Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica*, 14–21. <https://doi.org/10.13140/2.1.2167.2964>
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del cantón Cuenca. (2015). *PDOT 2015*.
- Gómez, J. A., Guan, C., Tripathy, P., Duque, J. C., Passos, S., Keith, M., & Liu, J. (2021). Analyzing the spatiotemporal uncertainty in urbanization predictions. *Remote Sensing*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/rs13030512>
- He, Q., Tan, R., Gao, Y., Zhang, M., Xie, P., & Liu, Y. (2018). Modeling urban growth boundary based on the evaluation of the extension potential: A case study of Wuhan city in China. *Habitat International*, 72, 57–65.
<https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2016.11.006>
- Hermida, M. A., Hermida, C., Cabrera, N., & Calle, C. (2015a). *La ciudad es esto. Medición y representación espacial para ciudades compactas y sustentables*. Universidad de Cuenca.
- Hermida, M. A., Hermida, C., Cabrera, N., & Calle, C. (2015b). Urban density as variable of city analysis. The case of Cuenca, Ecuador. *Eure*, 41(124), 25–44.
<https://doi.org/10.4067/s0250-71612015000400002>
- Jaramillo, C. (2017). *Estudio de metabolismo urbano en la ciudad de Cuenca*.
- Li, X., & Gong, P. (2016). Urban growth models: progress and perspective. *Science Bulletin*, 61(21), 1637–1650. <https://doi.org/10.1007/s11434-016-1111-1>
- Linares, S., & Clarke, K. (2018). *Simulación del crecimiento urbano de la ciudad de Tandil (Argentina) aplicando el modelo SLEUTH* View project *Fractal Topography View project*. <https://www.researchgate.net/publication/329844578>
- Martine, G. (2007). *Estado de la población mundial 2007. Liberar el potencial del crecimiento urbano*.
- Mejía, R. (2020). *Aerial photograph considering city sprawl*.
https://github.com/rmejiap/python-foundations-course/blob/master/01.FinalProject_v0.6.ipynb
- Mejía, V. (2014). *El Proceso de Urbanización en Cuenca, Ecuador*.
- Ministerio del Ambiente. (2015). *SISTEMA NACIONAL DE ÁREAS PROTEGIDAS DEL ECUADOR*. <http://areasprotegidas.ambiente.gob.ec/es/areas-protegidas/parque-nacional-cajas>
- NASA. (2013a). *Landsat 5*. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/article/landsat-5/>
- NASA. (2013b). *Landsat 7*. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/article/landsat-7/>

- NASA. (2013c, April). *Landsat 8*. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/article/landsat-8/>
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*.
- Organización de Naciones Unidas. (2018). *Las ciudades seguirán creciendo, sobre todo en los países en desarrollo*.
<https://www.un.org/development/desa/es/news/population/2018-world-urbanization-prospects.html>
- Sánchez, R. (2013). *Respuestas urbanas al cambio climático en América Latina* (R. Sánchez, Ed.). Naciones Unidas.
- Tripathy, P., & Kumar, A. (2019). Monitoring and modelling spatio-temporal urban growth of Delhi using Cellular Automata and geoinformatics. *Cities*, 90, 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.01.021>
- Ulloa-Espíndola, R., & Pérez-Albert, Y. (2022). Validación de un modelo de predicción del crecimiento urbano en Quito (Ecuador) construido mediante pesos de evidencia y autómatas celulares. *EURE*, 48(144), 1–27.
- Weng, Q. (2001). Modeling urban growth effects on surface runoff with the integration of remote sensing and GIS. *Environmental Management*, 28(6), 737–748. <https://doi.org/10.1007/s002670010258>
- Yeh, A., Li, X., & Xia, C. (2021). Cellular Automata Modeling for Urban and Regional Planning. In W. Shi, M. Goolchild, M. Batty, M. Kwan, & A. Zhang (Eds.), *Urban Informatics* (pp. 865–883). <http://www.springer.com/series/14773>