



**ESPE**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA  
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO GEÓGRAFO Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**TEMA: MODELAMIENTO DEL CRECIMIENTO URBANO EN EL  
CANTÓN IBARRA AL AÑO 2025 PARA LA PLANIFICACIÓN DEL USO Y  
OCUPACIÓN DEL SUELO**

**AUTORES:**

**ARELLANO PÉREZ, KAROL DENNISE**

**CASTRO BENAVIDES, BETTY SELENA**

**DIRECTOR: ING. PÉREZ SALAZAR, PABLO ROBERTO, MGS.**

**SANGOLQUÍ**

**2019**

## CERTIFICADO DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “*MODELAMIENTO DEL CRECIMIENTO URBANO EN EL CANTÓN IBARRA AL AÑO 2025 PARA LA PLANIFICACIÓN DEL USO Y OCUPACIÓN DEL SUELO*” fue realizado por las señoritas *Arellano Pérez, Karol Dennise y Castro Benavides, Betty Selena* el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 05 de abril de 2019

Firma:

Ing. Pablo Pérez

C.C.: 170636379-1



## AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

### AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *Arellano Pérez, Karol Dennise y Castro Benavides, Betty Selena*, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: “*MODELAMIENTO DEL CRECIMIENTO URBANO EN EL CANTÓN IBARRA AL AÑO 2025 PARA LA PLANIFICACIÓN DEL USO Y OCUPACIÓN DEL SUELO*” es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 05 de abril de 2019

Firma:

Arellano Pérez Karol Dennise

C.C.: 1724230568

Castro Benavides Betty Selena

C.C.: 1004026074

## AUTORIZACIÓN



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

### AUTORIZACIÓN

Yo, *Arellano Pérez, Karol Dennise* y *Castro Benavides, Betty Selena*, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: “**MODELAMIENTO DEL CRECIMIENTO URBANO EN EL CANTÓN IBARRA AL AÑO 2025 PARA LA PLANIFICACIÓN DEL USO Y OCUPACIÓN DEL SUELO**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 05 de abril de 2019

Firma:

Arellano Pérez Karol Dennise

C.C.: 1724230568

Castro Benavides Betty Selena

C.C.: 1004026074

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, mi familia, mi personita favorita y mis amigos, quienes me han acompañado y apoyado a lo largo de esta etapa de mi vida

A Jehová Dios porque me ha permitido disfrutar de salud y vida junto a mi familia, por darme la fuerza necesaria para superar los distintos obstáculos y aprovechar las oportunidades que se han presentado en esta etapa de mi vida.

A mis padres por guiarme en cada una de las decisiones que he tomado, por su amor, apoyo incondicional y paciencia, han ayudado a construir y forjar la persona que ahora soy. A mis ñaños Alexis y Erikita, por ser mi apoyo, mis mejores amigos, cómplices y consejeros favoritos, los amo demasiado.

A mi personita favorita, porque me ha demostrado su amor, y con el tiempo se ha convertido en mi apoyo, compañero de aventuras y mi mejor amigo, te amo.

A mis seres queridos (familia Pérez-Arellano) por los momentos compartidos y el cariño que siempre me han demostrado. En especial a mis abuelitos Panchito y Teresita (q.e.p.d.) cuyo anhelo siempre fue y será ver como profesionales a sus nietos.

A mis amigos/as del colegio y universidad con quienes he podido compartir tantos momentos, recuerdos y aventuras, gracias por su apoyo y esfuerzo para mantener viva esta amistad.

**Karol Arellano**

“Las oportunidades no son producto de la casualidad, más bien son resultado del trabajo”

**Tonatiuh**

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, quienes me guían a través de este camino con su amor incondicional y me dan la valentía que necesito para enfrentar cada reto. Todo lo que soy es gracias a ustedes, a sus sacrificios, y trabajo incansable por darnos la mejor vida a mis hermanos y a mí. Son lo mejor de mi vida, estoy eternamente agradecida con ustedes papitos, y siempre quiero ser una persona de la que ustedes puedan sentirse orgullosos.

A mis tíos Esmeralda y Washington, a quienes considero mis segundos padres, les dedico este pequeño logro y les agradezco por cuidarme, por tratarme siempre con cariño y respeto y por creer en mi capacidad e inteligencia para lograr mis metas.

A mis hermanos Andrés y Carolina, crecer a su lado es un verdadero privilegio ñaños, todos los momentos que compartimos desde la infancia los llevo conmigo. A pesar de que seamos muy diferentes el cariño que nos une me permite caminar por la vida con la seguridad de que siempre encontrare un refugio en ustedes. A mi familia, por el amor y calidez humana que encuentro a su lado.

A mis amigos por todos los momentos compartidos, por sus consejos, por siempre alentarme y ayudarme desinteresadamente para conseguir mis objetivos. Estoy muy agradecida con la vida por permitirme conocer personas tan maravillosas. Mi experiencia universitaria fue verdaderamente placentera a su lado.

**Selena Castro**

## **AGRADECIMIENTO**

Al GAD Municipal de Ibarra e Instituto Geográfico Militar, por facilitarnos la información necesaria para la realización de este proyecto.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, por darnos la oportunidad de formarnos en sus aulas como profesionales competentes con calidad humana.

A nuestro director de tesis Ing. Pablo Pérez por el apoyo brindado a lo largo del desarrollo de nuestro proyecto de titulación. A nuestros docentes colaboradores Ph.D. Rodolfo Salazar y Ph.D. Oswaldo Padilla por la guía y ayuda brindada para culminar este proyecto de titulación.

Por ultimo queremos expresar un agradecimiento especial a nuestros familiares y amigos que confiaron en nosotras y nos acompañaron a lo largo de esta etapa.

**Karol Arellano**

**Selena Castro**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xii
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT .....	xvi
CAPITULO I.....	1
1. PROBLEMA .....	1
1.1. Planteamiento del problema .....	1
1.2. Antecedentes.....	1
1.3. Justificación e importancia .....	3
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1. Objetivo General .....	4
1.4.2. Objetivos Específicos .....	4
1.5. Metas .....	5
1.6. Preguntas de Investigación .....	5
CAPITULO II .....	6
2. MARCO TEÓRICO .....	6
2.1. Modelos Urbanos.....	6

2.2. Crecimiento Urbano .....	7
2.2.1. Crecimiento urbano en el cantón Ibarra .....	8
2.2.1.1. Descripción político administrativo del cantón Ibarra .....	8
2.2.1.2. Delimitación urbana del cantón Ibarra .....	9
2.2.1.3. Crecimiento histórico poblacional y urbano de Ibarra .....	10
2.3. Simulación prospectiva.....	14
2.3.1. Modelos de simulación.....	14
2.3.1.1. Modelos basados en redes neuronales artificiales (RNA).....	15
2.3.1.1.1. Land Change Modeler (LCM).....	17
2.3.1.2. Modelos basados en autómatas celulares .....	20
2.3.1.2.1 DINAMICA EGO .....	21
2.3.2. Escenarios.....	29
2.4. Planificación Urbana .....	34
2.4.1. Normativa legal vigente .....	35
2.4.2. Uso de suelo .....	36
2.4.2.1. Suelo urbano.....	36
2.4.2.2. Suelo Rural.....	37
2.4.3. Plan de Uso y Ocupación del Suelo .....	38
2.4.4. Zonificación del suelo .....	38
2.4.4.1 Usos de suelo.....	39
2.4.4.2. Forma de ocupación del suelo.....	39
2.4.4.3. Intensidad de ocupación del suelo.....	40
2.4.4.4. Lote mínimo .....	40
2.4.4.5. Altura de edificación .....	40

CAPITULO III .....	41
3. METODOLOGÍA .....	41
3.1. Zona de estudio.....	42
3.2. Recopilación, generación y validación de la información.....	43
3.2.1. Generación de la Geodatabase .....	44
3.3. Escala.....	46
3.4. Análisis multitemporal .....	47
3.5. Calibración de modelos multivariable .....	48
3.5.1. Selección de variables .....	48
3.5.2. LCM basado en Redes Neuronales .....	49
3.5.2.1. Modelo de transición.....	49
3.5.2.2. Análisis de la fuerza explicativa potencial de las variables .....	50
3.5.2.3. Estructura del modelo de transición.....	51
3.5.2.4 Cálculo del potencial de transición .....	52
3.5.2.5. Cálculo probabilidad de transición.....	53
3.4.2.6. Predicción.....	54
3.5.3. Autómatas celulares .....	55
3.5.3.1. Modelo para el cálculo de matrices de transición .....	55
3.5.3.2. Modelo para el cálculo de rangos de los pesos de evidencia. ....	56
3.5.3.3. Modelo para el cálculo de coeficientes de los pesos de evidencia.....	58
3.5.3.4. Modelo para el análisis de la correlación espacial de las variables .....	59
3.5.3.5. Modelo para la simulación y validación de crecimiento urbano.....	60
3.5.3.6. Modelo para la optimización de pesos de evidencia mediante AG.....	64
3.6. Validación y comparación de modelos.....	65

3.6.1. Autómatas celulares con algoritmos genéticos .....	66
3.6.1.1. Validación .....	66
3.6.1.2. Comparación .....	67
3.6.2. Comparación LCM y DINAMICA .....	68
3.7. Generación de escenarios prospectivos al año 2025 .....	68
3.7.1. Selección de variables .....	68
3.7.2. Método MICMAC .....	70
3.7.3. Método de impactos cruzados SMIC .....	75
3.7.4. Mapas de escenarios prospectivos al año 2015 .....	77
3.8. Plan de uso y ocupación del suelo al año 2025 .....	77
4. RESULTADOS .....	78
4.1. Análisis multitemporal .....	78
4.2. Calibración de modelos multivariables .....	80
4.2.1. LCM basado en Redes Neuronales .....	80
4.2.1. Autómatas Celulares .....	83
4.3. Validación de modelos y comparación .....	89
4.4. Generación de escenarios .....	94
4.5. Plan de uso y ocupación del suelo .....	102
CAPITULO V .....	108
5.1. CONCLUSIONES .....	108
5.2 RECOMENDACIONES .....	110
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	111

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Modelos urbanos de ciudad</i> .....	7
<b>Tabla 2</b> <i>Crecimiento poblacional histórico del cantón Ibarra</i> .....	12
<b>Tabla 3</b> <i>Escala de calificación de la probabilidad de ocurrencia de la hipótesis</i> .....	34
<b>Tabla 4</b> <i>Censo de Población y Vivienda 2010 cantón Ibarra</i> .....	42
<b>Tabla 5</b> <i>VARIABLES consideradas en los modelos multivariantes</i> .....	48
<b>Tabla 6</b> <i>VARIABLES por componente</i> .....	69
<b>Tabla 7</b> <i>Áreas de coberturas que cambiaron a urbana</i> .....	80
<b>Tabla 8</b> <i>Coefficientes de la prueba V de Cramer aplicada a la variable explicativa</i> .....	80
<b>Tabla 9</b> <i>Matriz de probabilidad de transición</i> .....	82
<b>Tabla 10</b> <i>Matriz de transición simple</i> .....	83
<b>Tabla 11</b> <i>Matriz de transición múltiple</i> .....	83
<b>Tabla 12</b> <i>Estadístico de Cramer entre variables explicativas</i> .....	87
<b>Tabla 13</b> <i>Medidas de la estructura del paisaje</i> .....	88
<b>Tabla 14</b> <i>Conteo de celdas de los mapas de mínima similitud</i> .....	91
<b>Tabla 15</b> <i>VARIABLES claves e hipótesis</i> .....	94
<b>Tabla 16</b> <i>Probabilidad simple de ocurrencia de hipótesis dada por los expertos</i> .....	95
<b>Tabla 17</b> <i>Probabilidad de ocurrencia de escenarios tendencial, negativo y positivo.</i> .....	96
<b>Tabla 18</b> <i>Condiciones para generación de mapas de escenarios de crecimiento urbano.</i> .....	97
<b>Tabla 19</b> <i>Propuesta de zonificación para el uso agrícola</i> .....	104
<b>Tabla 20</b> <i>Propuesta de zonificación para el uso agroecológico</i> .....	104
<b>Tabla 21</b> <i>Propuesta de zonificación para el uso agrícola familiar</i> .....	105
<b>Tabla 22</b> <i>Propuesta de zonificación para el uso agrícola residencial</i> .....	105
<b>Tabla 23</b> <i>Propuesta de zonificación para el uso residencial</i> .....	106
<b>Tabla 24</b> <i>Propuesta de zonificación para el uso residencial condicionado</i> .....	107
<b>Tabla 25</b> <i>Propuesta de zonificación para el uso comercial</i> .....	107
<b>Tabla 26</b> <i>Propuesta de zonificación para otros usos</i> .....	107

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Patrones de ordenamiento de la ciudad .....	6
<b>Figura 2.</b> División política–administrativa del cantón Ibarra.....	9
<b>Figura 3.</b> Cabecera Cantonal del cantón Ibarra.....	10
<b>Figura 4.</b> Crecimiento urbano de Ibarra .....	13
<b>Figura 5.</b> Esquema de funcionamiento Perceptrón Multicapa (MLP) .....	16
<b>Figura 6.</b> Interfaz gráfica LCM .....	17
<b>Figura 7.</b> a) $An$ vs $An * exp(W+)$ para la variable distancia a vías b) $An * exp(W+)$ variable distancia a vías (m) para la determinación de puntos de quiebre .....	24
<b>Figura 8.</b> Diagrama de un algoritmo genético con sus entradas, salidas, modelo interno y funciones. ....	29
<b>Figura 9.</b> Plano de dependencia vs influencia o motricidad.....	33
<b>Figura 10.</b> Codificación para establecimiento de zonas homogéneas.....	39
<b>Figura 11.</b> Diagrama de procesos para el modelamiento del crecimiento urbano en el cantón Ibarra al año 2025.....	41
<b>Figura 12.</b> Zona de estudio.....	43
<b>Figura 13.</b> Geodatabase .....	46
<b>Figura 14.</b> Modelo de simulación de crecimiento urbano de Ibarra en LCM .....	49
<b>Figura 15.</b> Modelo de transición .....	50
<b>Figura 16.</b> Prueba V de Cramer para la variable distancia a áreas verdes .....	50
<b>Figura 17.</b> Transformación de la variable movimiento de masas .....	51
<b>Figura 18.</b> Estructura del modelo de transición .....	52
<b>Figura 19.</b> Parámetros de la red neuronal MLP .....	53
<b>Figura 20.</b> Panel Change Demand Modeling .....	54
<b>Figura 21.</b> Probabilidad de transición .....	54
<b>Figura 22.</b> Modelo de simulación de crecimiento urbano de Ibarra en DINAMICA .....	55
<b>Figura 23.</b> Modelo de cálculo de matrices de transición.....	56
<b>Figura 24.</b> Modelo de cálculo de matrices de transición.....	56
<b>Figura 25.</b> Función Determine Weights Of Evidence Ranges y parámetros para encontrar los puntos de quiebre .....	57

<b>Figura 26.</b> Modelo de cálculo de coeficientes de pesos de evidencia.....	58
<b>Figura 27.</b> Weights of Evidence editor para la modificación de rangos y coeficientes. ....	59
<b>Figura 28.</b> Modelo para el análisis de la correlación espacial de las variables .....	60
<b>Figura 29.</b> Modelo para la simulación del crecimiento urbano.....	61
<b>Figura 30.</b> Interfaz de Fragstats v4.2.1 para el cálculo de las medidas de la estructura del paisaje por clase y parche. ....	62
<b>Figura 31.</b> Modelo para la validación por ventanas múltiples. ....	63
<b>Figura 32.</b> Modelo de optimización de pesos de evidencia mediante algoritmos genéticos.....	64
<b>Figura 33.</b> Esquema de validación y comparación de modelos. ....	66
<b>Figura 34.</b> Matriz de influencia directa .....	72
<b>Figura 35.</b> Gráfica dependencia vs influencia para la influencia directa de las variables .....	73
<b>Figura 36.</b> Gráfica dependencia versus influencia para la influencia indirecta de las variables...	74
<b>Figura 37.</b> Ingreso de probabilidades simples.....	75
<b>Figura 38.</b> Probabilidad de ocurrencia obtenida para escenarios positivos .....	76
<b>Figura 39.</b> Mapas de uso urbano de Ibarra para los años 1996, 2010,2016.....	78
<b>Figura 40.</b> Distribución del área de crecimiento por parroquias .....	79
<b>Figura 41.</b> Parámetros de entrenamiento MLP .....	81
<b>Figura 42.</b> Mapa potencial de transición .....	82
<b>Figura 43.</b> Gráficas de variable vs peso de evidencia: a) distancia al uso urbana, b) distancia a vías, c) altura, d) distancia a mercados, e) distancia a áreas verdes, f) distancia al botadero, g) distancia a centros educativos, h) distancia a ríos, i) distancia a centros de salud, j) distancia a estadios k) movimientos en masa, l) pendiente, m) riesgo a inundación. ....	85
<b>Figura 44.</b> Gráfica de mínima similitud a diferentes tamaños de ventana para el modelo inicial 1996-2010.....	89
<b>Figura 45.</b> Gráfica de mínima similitud al nivel de tolerancia de una celda, en las fases de calibración y validación. ....	90
<b>Figura 46.</b> Mapas de crecimiento urbano al año 2016 de los modelos: a) autómatas celulares con AG (DINAMICA) y b) redes neuronales (LCM).....	92

<b>Figura 47.</b> Mínima similitud a distintos niveles de tolerancia para los modelos de autómatas celulares con AG (DINAMICA) y redes neuronales (LCM) .....	93
<b>Figura 48.</b> Escenarios tendencial, negativo y positivo .....	98
<b>Figura 49.</b> Desarrollo económico y consolidación del área urbana en la zona designada como comercial respecto al a) año 2016 para los escenarios b) tendencial, c) positivo y d) negativo al año 2025 .....	99
<b>Figura 50.</b> Cumplimiento de la ordenanza en la franja de protección de la laguna respecto al a) año 2016 para los escenarios b) tendencial, c) positivo y d) negativo al año 2025 ...	100
<b>Figura 51.</b> Cumplimiento de la ordenanza en la franja de protección de quebradas del río Tahuando respecto al a) año 2016 para los escenarios b) tendencial, c) positivo y d) negativo al año 2025 .....	101
<b>Figura 52.</b> Distribución del área de crecimiento por parroquias para el año 2025 .....	102
<b>Figura 53.</b> Área de crecimiento para el período (2016-2025) .....	102
<b>Figura 54.</b> Mapa de zonificación de usos de suelo de Ibarra .....	103

## **RESUMEN**

El crecimiento urbano en el cantón Ibarra se caracteriza por una urbanización desordenada y dispersa, en las áreas periféricas de la ciudad, reduciendo los espacios verdes y coberturas de vegetación natural, generando así una mayor demanda de infraestructura y servicios necesarios para estas nuevas zonas urbanas en las parroquias rurales. Como solución a este problema se plantea el modelamiento del crecimiento urbano en el cantón Ibarra al año 2025 para la planificación del uso y ocupación del suelo, para esto se calibraron los modelos multivariable de redes neuronales (LCM) y autómatas celulares con algoritmos genéticos (DINAMICA) para el periodo 1996-2010, estos modelos se compararon a través del cálculo de índices de mínima similitud al año 2016, donde el modelo de autómatas celulares con AG alcanzó una similitud con la realidad del 69,6%, superando con un 28.91% al modelo de redes neuronales para la ventana de interés de 11 celdas (una manzana urbana). Además, del análisis multitemporal se identificó como principales coberturas afectadas por el crecimiento urbano a las áreas de cultivos y pastos. Finalmente se generaron escenarios prospectivos (positivo, negativo y tendencial) considerando criterios de expertos, para proponer un Plan de Uso y Ocupación del suelo al año 2025, en base a la tendencia del crecimiento urbano, con usos y parámetros de edificación más apropiados a la realidad del suelo urbanizado.

## **PALABRAS CLAVE**

- **CRECIMIENTO URBANO**
- **REDES NEURONALES**
- **AUTÓMATAS CELULARES**
- **ALGORITMOS GENÉTICOS**
- **ESCENARIO PROSPECTIVO**

## **ABSTRACT**

The urban growth in Ibarra is characterized by a disorderly and dispersed urbanization, in the peripheral areas of the city, reducing the green spaces and natural vegetation coverage, generating a greater demand of infrastructure and services for these new urban areas. As a solution to this problem, the modeling of urban growth in Ibarra to the year 2025 was proposed for the planning of land use and occupation, for which multivariable models of neural networks (LCM) and cellular automata with genetic algorithms (DINAMICA) were calibrated for the period 1996-2010, these models were compared through the calculation of minimum similarity indexes, where the model of cellular automata with AG reached a similarity of 69.6% with the real urban use map for the year 2016, exceeding with 28.91% to the model of neural networks for the window of interest of 11 cells (an urban block), also in the multitemporal analysis, it was identified the areas of crops and pastures as the main coverage affected by urban growth. Finally, prospective scenarios were generated (positive, negative and trend) considering expert criteria, to propose a Land Use and Occupation Plan to the year 2025, based on the trend of urban growth, with uses and building parameters more appropriate to the reality of urbanized land

## **KEY WORDS**

- **URBAN GROWTH**
- **NEURAL NETWORKS**
- **CELLULAR AUTOMATA**
- **GENETIC ALGORITHMS**
- **PROSPECTIVE SCENARIO**

## **CAPITULO I**

### **1. PROBLEMA**

#### **1.1. Planteamiento del problema**

El crecimiento urbano en la ciudad de Ibarra es un proceso histórico directamente proporcional al crecimiento de la población que produce una urbanización desordenada y dispersa. Al analizar el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) del cantón, gran parte de las parroquias rurales que están ubicadas en las áreas periféricas de la ciudad, son ocupados por el desarrollo de edificaciones, reduciendo los espacios verdes y coberturas de vegetación natural, además de que las nuevas zonas urbanas no poseen la infraestructura y servicios necesarios. Para dar solución a este problema del territorio es necesario implementar medidas de planificación fundamentadas en escenarios futuros del crecimiento urbano generados a partir de modelos de simulación multivariable. Es por ello que se plantea el modelamiento espacial del crecimiento urbano del cantón Ibarra mediante análisis multivariable para simular y generar escenarios del crecimiento urbano, de manera que estos sean un apoyo en el desarrollo de un plan de uso y ocupación de suelo del cantón Ibarra.

#### **1.2. Antecedentes**

En la actualidad más de la mitad de la población mundial vive en zonas urbanas. El rápido incremento de la población asegura que las ciudades se encuentran en un fuerte proceso de expansión. El proceso de crecimiento urbano es horizontal y por lo general ocurre en las periferias de las ciudades donde se encuentra la zona rural (Soto, 2015).

De esta manera el crecimiento urbano puede entenderse como un cambio de cobertura y uso de suelo (CCUS), es decir, distintos tipos de coberturas comúnmente natural o agrícola cambian a cobertura urbana. Estos CCUS pueden ser modelados mediante un análisis multivariable de diferentes épocas relacionadas a un modelo matemático que determina la probabilidad de cambio. (Mas, Kolb, Houet, Paegelow, & Camacho, 2011).

El uso de estos modelos matemáticos para entender las dinámicas del territorio tomó fuerza en los años 50 con la introducción de las computadoras que aumentaron la capacidad de análisis y cómputo existentes (Berling-Wolf & Wu, 2004). Hoy en día existe un creciente interés por la amplia gama de modelos que explican los fenómenos urbanos ya que tienen la capacidad de simular escenarios futuros de crecimiento a partir de un conjunto de variables (Aguilera, 2006).

Los distintos paquetes de modelación tienen funciones y herramientas con requisitos y supuestos diferentes, emplean diferentes tipos de algoritmos que los vuelven propicios para distintos tipos de datos de entrada y el propósito de la modelación. Algunos de ellos son autómatas celulares, evaluación multicriterio y modelos basados en agentes (Aguilera, Gómez, & Cantergiani, 2010). Este modelamiento puede ser mejorado con el uso de inteligencia artificial. (Mas, Kolb, Houet, Paegelow, & Camacho, 2011).

Los modelos de simulación multivariable han demostrado su capacidad para crear escenarios prospectivos futuros de cambios de usos del suelo, en este caso de crecimiento urbano. Estos escenarios permiten predecir las tendencias actuales y las consecuencias de las distintas acciones para diseñar nuevas estrategias de desarrollo más equilibrado y ofrecer alternativas de futuro con los que se puede llevar a cabo una planificación territorial y urbana mejor fundamentada (Barreira, Gómez, & Aguilera, 2015).

### **1.3. Justificación e importancia**

El estudio del crecimiento urbano, permite apreciar los cambios cobertura y uso de suelo (CCUS) e identificar factores determinantes que comprende el proceso de urbanización (Aguilera, 2006). El desarrollo de modelos de simulación permite entender las dinámicas espacio temporales que ocasionaron los CCUS a través de una compleja relación de múltiples variables (Leija, Reyes, Reyes, Flores, & Sahagún, 2016). Por este motivo el estudio del crecimiento urbano además de evaluar posibles impactos en el territorio puede contribuir al planteamiento de estrategias de planificación territorial (Gutiérrez, Gómez, & Bosque, 2010).

Acorde al Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), el cantón Ibarra perteneciente a la provincia de Imbabura, registra un crecimiento poblacional del 51,6% entre los años 1990 y 2010 donde se registraron 181.175 personas con estimado de 211.235 habitantes en el año 2017. El cantón Ibarra alberga el 45,5 % de la población provincial, de los que el 77.12% de los habitantes están en la cabecera cantonal.

El acelerado crecimiento de la población y la acumulación de la misma en la cabecera cantonal reflejan en el territorio un crecimiento de la zona urbana en sentido horizontal. Esto ha ocasionado que en áreas periféricas de la ciudad, se ejerza una gran presión sobre las parroquias rurales (GAD Municipal de Ibarra, 2015). Este proyecto sería de gran utilidad para el Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) Municipal de Ibarra ya que la generación de escenarios de crecimiento urbano al año 2025 del cantón Ibarra, serviría como base para el desarrollo de posibles medidas de planificación territorial de uso y ocupación de suelo que promuevan un crecimiento ordenado.

Además se alinea con el objetivo 11, Ciudades y comunidades sostenibles de los Objetivos de Desarrollo Sostenible que hace mención a que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, y seguros a través de una planificación y gestión participativa, así como la adopción de políticas y planes integrados que promuevan el uso eficiente de recursos y una urbanización inclusiva y sostenible (PNUD, 2015).

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo General**

Modelar el crecimiento urbano en el cantón Ibarra al año 2025 para la planificación del uso y ocupación del suelo.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Realizar un estudio multitemporal del crecimiento urbano del cantón Ibarra en los años 1996, 2006, 2016.
- Aplicar diferentes modelos multivariable mediante el análisis de uso y cobertura de suelo, y variables explicativas para la simulación del crecimiento urbano al año 2016
- Validar los modelos generados mediante la comparación de los mapas simulados y los mapas reales para determinar el modelo que mejor se ajusta a la realidad.
- Generar escenarios prospectivos con el modelo mejor ajustado al año 2025 para la elaboración de un plan de uso y ocupación del suelo del cantón Ibarra

### **1.5. Metas**

- Una base de datos de información a escala 1:50000 de las variables y coberturas de uso y suelo de los años 1996, 2006 y 2016.
- Un análisis cuantitativo de la cantidad de cambio de las coberturas de suelo de los años 1996, 2006 y 2016.
- Mapas de simulación de crecimiento por distintos modelos multivariable para el año 2016.
- Un análisis de la comparación del ajuste de los modelos a la realidad
- Tres mapas de crecimiento urbano del cantón Ibarra para el año 2025 con distintos escenarios.
- Plan de uso y ocupación del suelo del cantón Ibarra para el año 2025.

### **1.6. Preguntas de Investigación**

- ¿Cómo se puede regular el crecimiento urbano del cantón Ibarra?
- ¿Cómo ocurrió el crecimiento urbano en el cantón de Ibarra a partir del año 1996?
- ¿Cómo se puede modelar el crecimiento urbano del cantón Ibarra?
- ¿Qué modelos de simulación se ajusta mejor al crecimiento urbano del cantón Ibarra?
- ¿Cómo se puede regular los cambios de uso y ocupación del suelo del cantón Ibarra?

## CAPITULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Modelos Urbanos

Los modelos urbanos pueden definirse como una abstracción simplificada de la realidad del funcionamiento y comportamiento espacial de factores económicos y sociales que presentan distintos tipos de ciudades (Alvárez, 2010). La ciudad es un hecho colectivo y complejo, que experimenta una continua extensión de superficie urbana construida y densificación de zonas urbanas, debido al impacto del cambio tecnológico, la urbanización acelerada y la globalización económica (Frediani, 2006).

Dentro de los modelos más conocidos se distinguen tres tipos: la ciudad compacta, la ciudad dispersa y los sistemas policéntricos. Estos modelos teóricos se superponen entre sí, a diferente nivel, lo que hace que los sistemas urbanos reales sean estructuras híbridas resultado de las diferentes estrategias territoriales bajo las que se han desarrollado a lo largo de la historia (Nogués & Salas, 2009). En la Figura 1 y Tabla 1 se observan y definen las características más importantes.



**Figura 1.** Patrones de ordenamiento de la ciudad

Fuente: (Sanabria & Ramírez, 2017)

**Tabla 1**  
*Modelos urbanos de ciudad*

<b>Ciudad Compacta</b>	<b>Ciudad Dispersa</b>	<b>Sistemas Policéntricos</b>
- Actividad centralizada	- Descentralización	- Varios centros o subcentros en la ciudad
- Crecimiento continuo y dentro de los límites de la ciudad.	- Dispersión de la urbanización, mayor uso de suelo	- Dinámica comercial y de servicios en las áreas periféricas
- Gran diversidad de uso en poco espacio	- Predominio de vivienda unifamiliar	- Zonas interconectadas a través de sistema de transporte
- Cercanía a equipamientos y servicios	- Dificil gestión de infraestructura, servicios y equipamiento	- Dispersión de polos de trabajo, ocio y vivienda
- Alta densidad edificatoria	- Edificación dispersa	
- Predominio de transporte público y peatones	- Predominio del transporte privado	
- Estructura radiocéntrica en general		

Fuente: (Gregório, 2011; Santana, 2014)

## **2.2. Crecimiento Urbano**

El crecimiento urbano es un fenómeno dinámico cuya velocidad y magnitud de cambio se ha acelerado en las últimas décadas, se ha visto impulsado por el crecimiento económico, la industrialización, el desarrollo agrícola y el aumento de la población urbana, generando como consecuencia la expansión de nuevos espacios urbanizados, resultado de un proceso complejo, condicionado por el medio físico y factores socio-económicos y políticos que interactúan entre sí (Gutiérrez, Gómez, & Bosque, 2010).

La expansión horizontal de áreas urbanas en la periferia de las ciudades genera modificaciones en la cobertura natural y uso de suelo, ya que por lo general involucra un proceso de conversión de tierras de uso natural o agrícola a usos residenciales o desarrollados, lo cual provoca una serie de impactos negativos que incluyen la pérdida de suelo de alto valor productivo, fragmentación de ecosistemas, degradación y modificación del paisaje, entre otros (Aguilera, 2006; Soto, 2015).

A partir del conocimiento de estos impactos y los cambios importantes que presentan la estructura de las ciudades en desarrollo, surge la necesidad de implementar estrategias sustentables de planificación urbana que partan de un mejor conocimiento de los patrones espaciales, de las causas e impactos de la urbanización y de la identificación de los factores que dirigen el crecimiento urbano hacia determinadas zonas, con la finalidad de elaborar políticas de regulación del uso del suelo que puedan ser adoptadas por las ciudades para limitar la expansión urbana (Gutiérrez et al., 2010; Daude et al., 2017).

### **2.2.1. Crecimiento urbano en el cantón Ibarra**

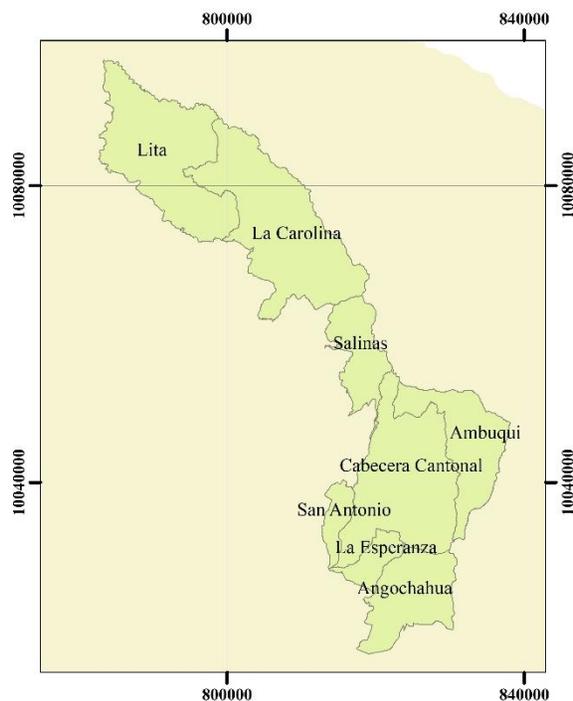
El cantón Ibarra ha demostrado con el transcurso del tiempo, que se encuentra en constante crecimiento y evolución, pues según estadísticas de INEC (2010) se data una explosión demográfica desde el año 1990, lo que ha provocado que exista una mayor demanda de equipamientos y servicios básicos en los centros urbanos del cantón, sobre todo en la ciudad de Ibarra y las zonas urbanas más cercanas.

Para entender cómo ha evolucionado el crecimiento urbano del cantón Ibarra, es necesario realizar un diagnóstico del cantón, que implica una revisión de sus características político-administrativas, los sucesos históricos más importantes por los que ha atravesado y un análisis de los posibles factores que han contribuido a su crecimiento urbano.

#### **2.2.1.1. Descripción político administrativo del cantón Ibarra**

El cantón Ibarra está conformado administrativamente por 5 parroquias urbanas y 7 parroquias rurales, sin embargo, se pueden definir dos áreas geográficas importantes de análisis, la cabecera cantonal y las parroquias rurales (Figura 2). Cabe mencionar que factores como el tamaño del

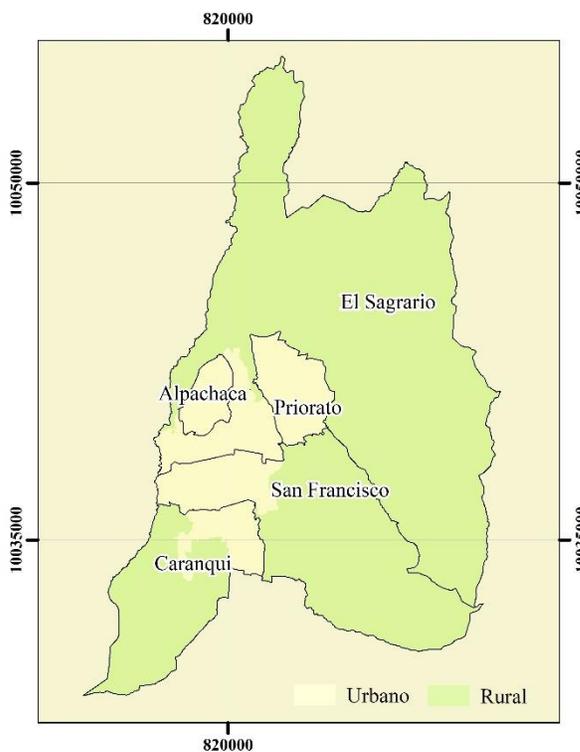
territorio, la dotación de servicios básicos y la densidad de la población suelen diferenciar lo urbano y lo rural (Herrera, 2011; UTN, 2013).



**Figura 2.** División política-administrativa del cantón Ibarra

### 2.2.1.2. Delimitación urbana del cantón Ibarra

El cantón Ibarra forma parte de la provincia de Imbabura, y es donde se encuentra la ciudad de Ibarra, que en conjunto con sus parroquias urbanas conforman la unidad territorial denominada cabecera cantonal (Figura 3), a este tipo de división político administrativa según el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) se le define como área urbana o núcleo urbano. Otros elementos que definen esta área son: densidad edificada, poblacional y actividad no agrícola (Herrera, 2011).



**Figura 3.** Cabecera Cantonal del cantón Ibarra

De acuerdo al Registro Oficial N° 445 emitido en 2004, se expide la Ordenanza que fija los límites urbanos de la ciudad de Ibarra y sus parroquias urbanas, estableciendo cinco unidades de planificación y gestión administrativa: Alpachaca, La Dolorosa del Priorato, El Sagrario, San Francisco y Caranqui, se incluyen barrios y comunidades que se encuentran distribuidos en el área rural de las parroquias de El Sagrario, San Francisco y Caranqui (Herrera, 2011).

### **2.2.1.3. Crecimiento histórico poblacional y urbano de Ibarra**

El 28 de septiembre de 1606 se fundó e instaló la Villa de San Miguel de Ibarra con una población de 158 habitantes, cuyo modelo administrativo estableció un tipo de “Ordenanza Municipal” que determinaba la demarcación de límites entre vecinos de solares y designaba espacios comunitarios como plazas, mercados y solares para edificaciones de servicio público. La

normativa logró extenderse hasta el sector rural designando espacios para pastizales y sembríos, que cubrirían necesidades alimenticias de la pequeña población (IMI 1906, citado en Herrera, 2011).

Con el tiempo, la Villa de San Miguel de Ibarra presentó un progresivo adelanto en su población, estructura, comercio, industria y establecimientos públicos, considerándola acreedora de una mayor condecoración política para la representación pública, razón por la que se le concede y declara el título de ciudad un 11 de noviembre de 1811 por la Junta Soberana de Quito y nuevamente un 2 de noviembre de 1829 mediante el decreto del Libertador Simón Bolívar, cuya acta constituyó en ese mismo momento el Archivo Municipal de Ibarra (GAD Municipal San Miguel de Ibarra, 2014).

Tras el terremoto ocurrido en 1868, la ciudad de Ibarra quedó en ruinas y sin posibilidad de habitarse, pues su comunidad decidió trasladarse al sector de La Esperanza por el temor de nuevos movimientos telúricos. No fue sino hasta el 28 de abril de 1872 cuando la población ibarreña retornó a la villa de San Miguel de Ibarra y con la dirección del entonces Jefe Civil y Militar de Imbabura Dr. Gabriel García Moreno se procede a reconstruir y a reinstalar definitivamente la ciudad (Naranjo et al., 2013).

De acuerdo al registro histórico de censos realizados por el INEC (2010) en el cantón Ibarra, en la Tabla 2 se puede apreciar como su población total ha crecido de manera exponencial en todos los años registrados, de hecho hasta el año 1982 la población urbana fue menor que la población rural, pero para el año 1990 se puede apreciar un incremento exponencial de la población urbana y un decrecimiento de la población rural, respecto a las registradas en el año 1984 y ya posterior al

año 1990 tanto la población urbana como rural del cantón Ibarra comienzan a crecer de forma proporcional en años posteriores.

**Tabla 2**  
*Crecimiento poblacional histórico del cantón Ibarra*

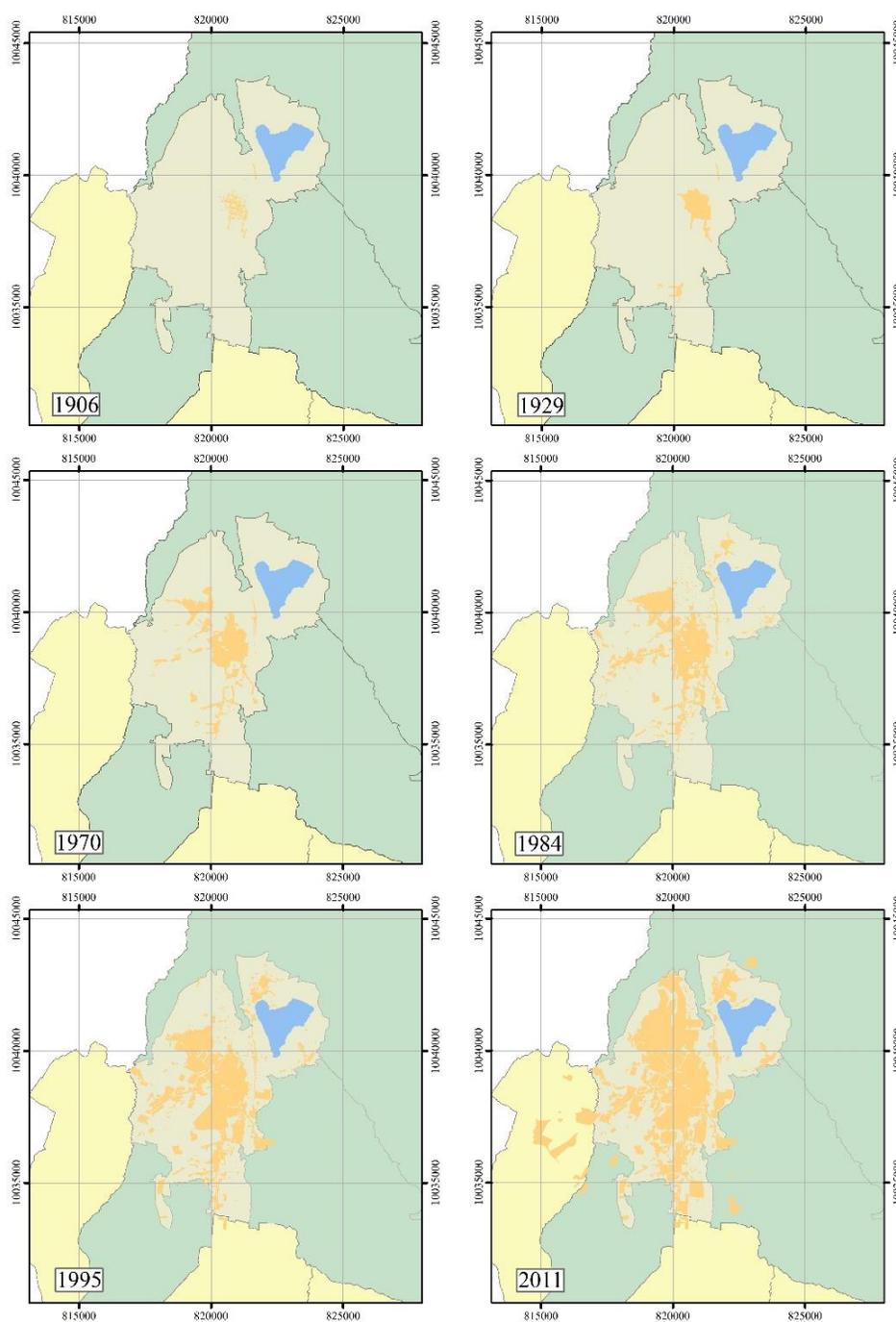
Año	Población		
	Urbana	Rural	Total
1950	14.031	47.132	61.163
1962	25.835	56.887	82.722
1974	41.335	67.819	109.154
1982	53.428	58.183	111.611
1990	80.991	38.502	119.493
2001	108.535	44.721	153.256
2010	131.856	49.319	181.175

Fuente: (INEC, 2010)

De acuerdo a (Herrera, 2011) existen altas tasas de crecimiento poblacional en el centro urbano y San Antonio, y un decrecimiento sobre todo en las parroquias rurales de la Carolina, Angochagua y Ambuquí, lo cual hace suponer que la falta de condiciones adecuadas en áreas esenciales (comunicación, abastecimiento de electricidad, agua potable, alimentos, infraestructura de salud, educación, administración, seguridad, recreación y patrimonial) han motivado a los ciudadanos de las parroquias rurales a migrar hacia el centro urbano o zonas urbanas cercanas. De hecho, según (Naranjo, et al., 2013) el 86% de la superficie del cantón no presenta una concentración particular de equipamientos y servicios básicos.

Todo este crecimiento poblacional ha ocasionado un esparcimiento en sentido horizontal en el centro urbano (Figura 4). Además según Herrera, (2011) la estructura edificada en Ibarra tiende a dispersarse del centro, sobre todo en la ciudad, como consecuencia de la especulación de tierras, una forma muy común de encarecer el suelo que queda inmerso en la ciudad, provocando la búsqueda de un suelo más accesible en las áreas periféricas. Un factor que incita este crecimiento

desproporcionado según (Herrera, 2011) , es la creación de conjuntos habitacionales en el área periurbana bajo la modalidad de propiedad horizontal, la cual ha fragmentado el suelo y generado presión en la ciudad por ser incorporado como parte de ella.



**Figura 4.** Crecimiento urbano de Ibarra

### **2.3. Simulación prospectiva**

La prospectiva es una herramienta que permite aproximarse al futuro abordando la complejidad múltiple e indeterminada de la realidad dando como resultado infinitas posibilidades de la acción humana (Cely, 1999). La complejidad del crecimiento urbano se deriva de las dinámicas internas y externas de la ciudad y de sus cambios como algo que incluye múltiples interferencias y agentes (Polidori, Saraiva, Peres, Toralles, & Tomiello, 2015)

La simulación prospectiva es una importante herramienta para el urbanismo ya que permite la interacción de factores físicos, sociales y ambientales (Polidori et al., 2015). Tiene como objetivo generar escenarios futuros hipotéticos: tendenciales, positivos o negativos que den soporte a la planificación, ayudando a mostrar las consecuencias de posibles tendencias, metas a alcanzar o cambios en determinadas políticas (Aguilera, Gómez, & Cantergiani, 2010; Gómez, Aguilera, Barreira, Bosque, & Rodríguez, 2014). Tiene dos instrumentos fundamentales los escenarios y los modelos de simulación.

#### **2.3.1. Modelos de simulación**

Los modelos de simulación son instrumentos que permiten construir diferentes escenarios de comportamiento del espacio urbano, para ello intentan identificar los patrones de cambio que dirigen el crecimiento urbano hacia determinadas zonas como respuesta a factores internos o externos al área de estudio, pretendiendo averiguar las “reglas” que rigen la dinámica de cambio de usos de suelo en el área urbana (Díaz & Hewitt, 2013).

Debido al carácter geográfico y social tan dinámico y complejo que presenta las áreas urbanas, surgen los modelos geográficos. El objetivo de estos modelos es localizar espacialmente los lugares

susceptibles de manifestar algún cambio en los usos de suelo, para ello utilizan técnicas basadas en Sistemas de Información Geográfica (SIG), que representen los cambios que ocurren en el territorio a través de mapas, generalmente en formato raster, donde la unidad espacial está representada por cada celda de una tesela raster (Díaz & Hewitt, 2013).

La disposición en el espacio de esta celda (célula) para acoger una determinada clase de uso de suelo se define por una serie de normas de transición relacionadas con características de accesibilidad y aptitud del área de estudio para que se desarrolle el fenómeno de interés (por ejemplo, crecimiento urbano). El resultado indica el potencial de cada unidad de espacio (celda en el mapa raster) para mutar a una categoría específica de uso de suelo y finalmente realizar simulaciones prospectivas (Díaz & Hewitt, 2013).

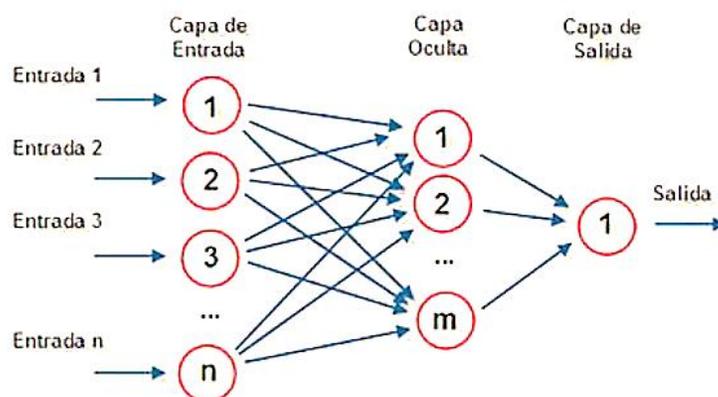
En la actualidad, gracias al impulso de la informática, han surgido numerosos instrumentos de modelización, cuyas diferencias suelen depender de la manera en que determinan una localización u otra para ser ocupada por nuevos usos. Para el caso de la simulación del crecimiento urbano se pueden encontrar modelos basados en autómatas celulares, redes neuronales, en agentes, técnicas de regresión, técnicas de evaluación multicriterio (EMC), lógica difusa, entre otros (Gómez et al., 2014).

#### **2.3.1.1. Modelos basados en redes neuronales artificiales (RNA)**

Las RNA son sistemas de aprendizaje y procesamiento automático inspirados en el funcionamiento del cerebro humano. Es un instrumento de cálculo masivo, organizado en un conjunto de unidades de procesamiento llamadas neuronas o nodos, que se encuentran interconectados en una serie de capas organizadas de manera jerárquica. Estos nodos se activan a

causa de un interruptor binario que se conoce como función de activación. Si el nodo se activa, transmite información a la cadena de procesos. Cada nodo es capaz de recibir información desde múltiples nodos procedentes de capas anteriores (Díaz & Hewitt, 2013).

La estructura de RNA más utilizada es la Perceptrón Multicapa (MLP), que consiste en un nodo único, que recibe entradas ponderadas aleatoriamente, dando lugar a resultados de acuerdo a unas reglas (umbrales) definidas. Este instrumento es capaz de clasificar linealmente y de manera separada, datos, a la vez que desarrolla funciones lineales. Consiste en tres tipos de capa: entrada, oculta y salida (Figura 5) y es capaz de identificar relaciones de naturaleza no lineal (Díaz & Hewitt, 2013).



**Figura 5.** Esquema de funcionamiento Perceptrón Multicapa (MLP)

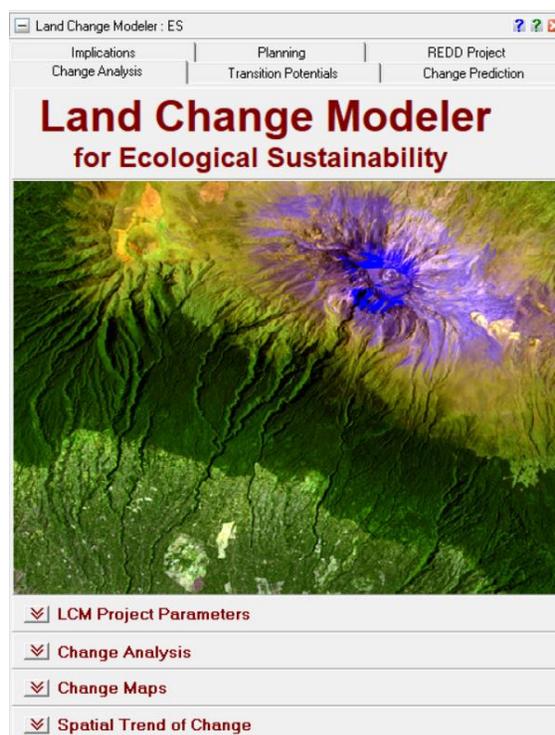
Fuente: (Díaz & Hewitt, 2013)

Las RNA son apropiadas para la modelización de la dinámica espacio-temporal de los cambios de usos de suelo, se encuentran en la categoría de modelo potencial de transición, debido a que evalúa la probabilidad de cambio de usos de suelo y para ello establece relaciones funcionales entre una serie de variables que en cierto modo tienen poder explicativo en la ubicación de estos cambios. Es una herramienta predictiva potente para la localización futura de usos de suelo, debido a su

capacidad de detección de patrones de comportamiento extraídos de la comparación de dos momentos temporales más o menos distantes entre sí (Díaz & Hewitt, 2013).

### 2.3.1.1.1. Land Change Modeler (LCM)

LCM es un software integrado dentro de IDRISI (Figura 6), es una herramienta utilizada para la evaluación y la predicción de cambios en el uso de suelo de un área en la superficie terrestre, donde para el cálculo de probabilidad de cambio y la definición de patrones de localización del uso de suelo puede emplear un algoritmo basado en RNA (Eastman, 2012).



**Figura 6.** Interfaz gráfica LCM  
Fuente: Eastman (2012)

Para el análisis integrado de los cambios en el uso de suelo de la superficie terrestre y su proyección en el futuro, en LCM se llevan a cabo los siguientes procesos:

### **a) Análisis de cambios**

Consiste en realizar una evaluación cuantitativa de los cambios de uso de suelo entre dos mapas de distintas fechas, se visualizan las pérdidas, ganancias, cambio neto, transiciones de persistencia y específicas por categoría específica de uso de suelo, cada celda de la información raster corresponde a una categoría. Esta información sirve como un diagnóstico de los cambios que han sufrido los usos de suelo en un lapso de tiempo (Eastman, 2012).

### **b) Análisis de la fuerza explicativa de las variables**

En este proceso, para cada una de las transiciones de los usos de suelo que se quieren simular, se debe seleccionar un grupo de variables explicativas, cuyo patrón espacial manifieste algún tipo de comportamiento potencial que explique la ubicación de cada uno de los cambios de usos de suelo que se quieren simular (Díaz & Hewitt, 2013).

A las variables seleccionadas se les puede aplicar el test de correlación  $V$  de Cramer, que se presenta en una tabla de contingencia de  $2 \times 2$ , y que es una prueba rápida de la fuerza explicativa potencial de una variable para que se produzca una transición. Variables con una  $V$  de Cramer alta indica que su valor explicativo potencial es bueno, aunque no garantiza un desempeño bueno, es un buen indicador de que una variable pueda descartarse si su valor es bajo, además se calcula un valor  $p$  que expresa la probabilidad de que la  $V$  de Cramer no sea tan diferente de 0, lo cual supone que todos los píxeles son elegidos independientemente y no dependen espacialmente de sus valores (Díaz & Hewitt, 2013).

### **c) Potencial de transición**

Una vez seleccionadas las variables del modelo, se calcula su potencial de transición a través del algoritmo Perceptrón Multicapa (MLP), el cual se basa en la búsqueda de relaciones entre las variables explicativas y la ubicación del uso de suelo de interés a modelar. Es capaz de encontrar los pesos adecuados en un proceso que se basa en la aplicación aleatoria de una serie de valores de ponderación a la capa de entrada (distancia conocida a la ubicación de una determinada clase de uso de suelo en el tiempo  $t_0$ ), para luego compararlos con la capa de salida esperada (distancia conocida a la localización de esta clase de suelo en el tiempo  $t_1$ ). A este proceso de incorporación de valores de ponderación de entrada a la red neuronal, evaluación del error de conjunto y posterior distribución del error en la red se conoce como ciclo. Después de cierto número de ciclos se alcanza un umbral de ajuste (generalmente entre 4.000 a 10.000 ciclos), donde los valores de salida comienzan a producir pocas mejoras respecto al nivel de error calculado y el proceso se detiene. El resultado es un mapa del potencial de transición para cada uso de suelo (Díaz & Hewitt, 2013).

### **d) Simulación de cambios**

Dado el mapa de potencial de transición, donde cada celda adquiere un valor de aptitud para mutar hacia un determinado estado de uso de suelo o permanecer estable en cada iteración, se procede a especificar la fecha final de simulación, donde la cantidad de cambio en cada transición puede ser modelada por medio del análisis Markov Chain (Cadena de Markov). Hay dos modelos básicos de cambios: un modelo de predicción dura basado en un modelo de asignación competitiva de terreno similar a un proceso de decisión multi-objetivo y un modelo de predicción blanda que produce un mapa de vulnerabilidad para cambiar por el grupo de transiciones seleccionado (Eastman, 2012).

### e) Validación

Es un proceso que permite determinar la precisión del mapa de predicción de uso de suelo en relación con el mapa real. Para ello utiliza una tabulación cruzada de 3 líneas entre el último mapa de uso de suelo, el mapa de la predicción y el mapa de la realidad. Los datos ilustrarán la precisión de los resultados del modelo, donde (Eastman, 2012):

A |B |B = Aciertos - El modelo predijo un cambio y éste ocurrió

A |A |B = Errores - El modelo predijo una persistencia, pero hubo un cambio

A |B |A = Falsa Alarma - El modelo predijo un cambio, pero éste no ocurrió

#### 2.3.1.2. Modelos basados en autómatas celulares

Los autómatas celulares (AC) son sistemas simples que reproducen dinámicas espaciales complejas (Ticona, 2015) en las que el paisaje se representa a través de un arreglo de celdas (Espinoza, 2016) y el estado de cada celda depende de los estados previos de las células en su vecindad, siguiendo un conjunto de reglas de transición (Sapena, Ruiz, & Joó, 2017).

Los modelos basados en AC son ampliamente utilizados entre los numerosos instrumentos de modelización espacial debido a su capacidad para modelar dinámicas determinísticas no lineales, propias de los procesos de expansión urbana (Barreira, Gómez, & Aguilera, 2015). Otra ventaja que presentan los autómatas es que son adaptables a numerosas situaciones que representan comportamientos espaciales (Aguilera, 2006).

### 2.3.1.2.1 DINAMICA EGO

Es un software desarrollado por la Universidad Federal de Minas Gerais en Brasil que ha ganado popularidad debido a su flexibilidad, gratuidad y capacidad de modelar dinámicas complejas (Espinoza, 2016). DINAMICA es una importante herramienta dentro de los estudios de cambios de cobertura y uso de suelo (CCUS) ya que permite su modelización a través de algoritmos de autómatas celulares y pesos de evidencia de distintas variables explicativas responsables de la transformación (Leija et al., 2016). La modelización de los CCUS puede ser descompuesta en varios submodelos:

#### a) Cálculo de las matrices de transición

Una matriz de transición describe la cantidad de cambio que se produce en un período discreto de tiempo y permiten al modelo conocer la cantidad de celdas que deberían realizar el cambio de un estado a otro, estas matrices pueden ser modificadas de acuerdo al escenario que se desea generar (Soares-Filho, Rodrigues, & Costa, 2009). Las tasas de transición brutas especifican la cantidad de cambio en unidades de área, mientras que las tasas netas determinan el porcentaje de cambio, DINAMICA determina el porcentaje dividiendo la tasa neta para el área del uso anterior al cambio (Reyna, Reyna, & Vines, 2017). La ecuación (1) muestra como el valor de una variable es igual a la suma de los porcentajes fijos de las variables en el periodo anterior.  $P_{ij}$  se entiende como el porcentaje de celdas que cambiaron de  $i$  a  $j$ . La diagonal de la matriz no debe ser especificada ya que DINAMICA modela únicamente los cambios, la suma a largo de las columnas deben ser igual a 1 (Soares-Filho, Rodrigues, & Costa, 2009).

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ \vdots \\ j \end{bmatrix}_{t=v} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{21} & P_{31} & \cdots & P_{i1} \\ P_{12} & P_{22} & P_{32} & \cdots & P_{i2} \\ P_{13} & P_{23} & P_{33} & \cdots & P_{i3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{1j} & P_{2j} & P_{3j} & \cdots & P_{ij} \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ \vdots \\ j \end{bmatrix}_{t=0} \quad (1)$$

Las matrices obtenidas presentan las tasas de transición por periodo de tiempo (matriz simple) o referidas a una unidad de tiempo comúnmente años (múltiples) (Espinoza, 2016).

### b) Cálculo de rangos y coeficientes de pesos de evidencia

Los pesos de evidencia es un método geoestadístico (estadística Bayesiana) que permiten establecer el efecto de cada variable explicativa sobre la transición sin considerar el resto de variables (Reyna, Reyna, & Vines, 2017). Para obtener los pesos de evidencia, DINAMICA incorpora el método adaptado de Agterberg & Bonham-Carter (1990); Goodacre et al. (1993); Bonham-Carter (1994) citados en Soares-Filho, Rodrigues, & Costa (2009).

En primer lugar, se realiza la transformación de variables continuas en categóricas sin perder la estructura de sus datos. Para esto se establece un delta mínimo ( $Dx$ ) utilizado para construir  $n$  buffers incrementales ( $Nx$ ) dando como resultado intervalos de  $X$  mínimo a  $X$  mínimo +  $nDx$ .  $An$  es el número de celdas dentro de un buffer ( $Nx$ ) múltiplo de  $n$  y  $dn$  es el número de ocurrencias del evento modelado ( $D$ ) dentro del buffer (Soares-Filho, Rodrigues, & Costa, 2009). Después se calculan los valores de  $W^+$ ,  $C$  y  $S^2$  para cada buffer acorde a las ecuaciones 2, 3, 4 y 5.

$$\ln\{D|B\} = \ln\{D\} + W^+ \quad (2)$$

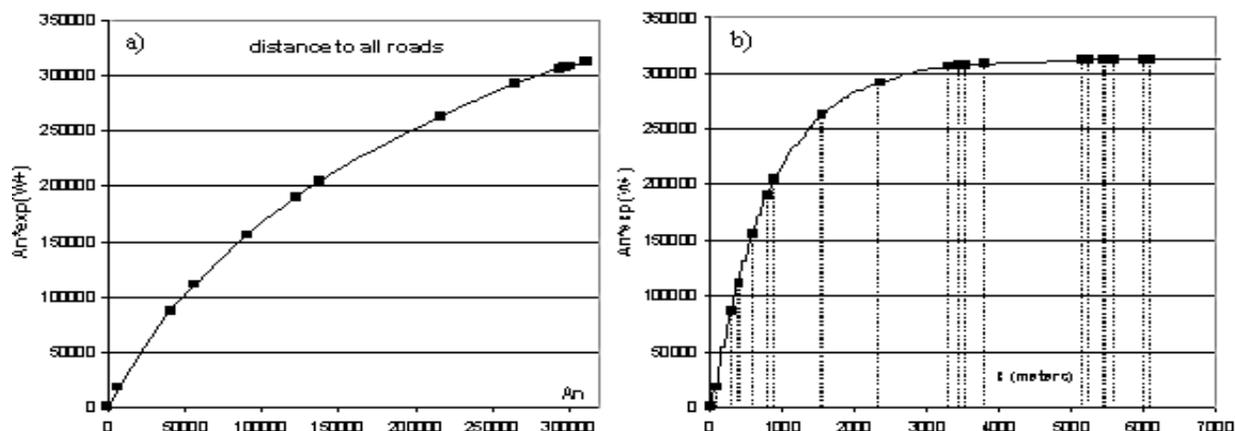
$$W^- = \ln\left(\frac{P\{\bar{B}|D\}}{P\{\bar{B}|\bar{D}\}}\right) \quad (3)$$

$$C = W^+ - W^- \quad (4)$$

$$S^2 = \frac{1}{\text{area}(B \cap D)} + \frac{1}{\text{area}(B \cap \bar{D})} + \frac{1}{\text{area}(\bar{B} \cap D)} + \frac{1}{\text{area}(\bar{B} \cap \bar{D})} \quad (5)$$

Donde  $W^+$  es el peso de evidencia positivo de la ocurrencia del evento ( $D$ ) dada la presencia de la variable binaria ( $B$ ), en contraste, se calcula  $W^-$  que corresponde al peso de evidencia negativo, donde ( $\bar{B}$ ) es la ausencia de  $B$ .  $C$  representa el contraste e indica la asociación espacial global del evento ( $D$ ) con la variable ( $B$ ). La relación entre la variable ( $B$ ) y el evento ( $D$ ) es estadísticamente significativa al 95% si  $|C| > 1,96 S(C)$ , esta varianza que se obtiene mediante la ecuación (5) antes citada (Soares-Filho, Rodrigues, & Costa, 2009).

A continuación (Figura 7) se grafica un conjunto de valores  $An$  versus  $An * \exp(W^+)$  y los puntos de quiebre son determinados mediante un algoritmo de generalización de líneas, para que este último sea aplicado el usuario debe proporcionar los siguientes parámetros: mínima distancia del intervalo en  $X$  ( $mindx$ ), máxima distancia de intervalo en  $X$  ( $maxdx$ ) y un ángulo de tolerancia  $ft$ . Para una distancia entre dos puntos a lo largo de  $x$  ( $dx$ ) ente  $mindx$  y  $maxdx$  se coloca un nuevo punto de quiebre si  $dx > maxdx$  o si se supera el ángulo de tolerancia (Soares-Filho, Rodrigues, & Costa, 2009).



**Figura 7.** a)  $An$  vs  $An * exp(W^+)$  para la variable distancia a vías b)  $An * exp(W^+)$  variable distancia a vías (m) para la determinación de puntos de quiebre

Fuente: (Soares-Filho, Rodrigues, & Costa, 2009)

Los pesos evidencias positivos indican que la categoría favorece el cambio, mientras que los pesos negativos impiden el cambio. Los coeficientes de los pesos de evidencia pueden funcionar bajo un enfoque totalmente automático, mediante la conservación de los pesos calculados con las ecuaciones (2) y (3) o se puede integrar el conocimiento experto mediante la modificación de los pesos, esto genera mayor confiabilidad en la generación de escenarios de cambio acorde a diversos autores (Leija et al., 2016; Mas et al., 2011). Los coeficientes obtenidos de manera automática pueden ser optimizados mediante el uso de algoritmos genéticos.

### c) Análisis de la correlación espacial de las variables

Debido a que el método de pesos de evidencia asume que las variables son espacialmente independientes, se calculan ciertas medidas que permiten confirmar la hipótesis de no correlación de las variables (Leija et al., 2016). El estadístico de Cramer permite obtener la correlación entre dos variables, opera en el rango entre 0 y 1, un valor cercano a 1 indica un elevado grado de

correlación por lo que una de las variables deberá ser eliminada. No existe un límite de tolerancia definido, pero por lo general se considera el valor de 0,5 (Espinoza, 2016).

#### **d) Probabilidad de transición**

La asignación de los cambios se produce en las celdas con la mayor probabilidad de transición que se calcula en función de los pesos de evidencia mediante la ecuación (6). El valor resultante se entiende como la probabilidad de ocurrencia de la transición del estado  $i$  al estado  $j$  dado un conjunto de variables  $(B, C, D, \dots, N)$  para cada celda con una posición  $(x, y)$  (Soares-Filho, Rodrigues, & Costa, 2009).

$$P\{i \Rightarrow j | B \cap C \cap D \dots \cap N\} = \frac{e^{\Sigma w^+}}{1 + e^{\Sigma w^+}} \quad (6)$$

#### **e) Simulación de cambios**

Para la simulación se realizan iteraciones, que representan el paso del tiempo, generalmente en años, sobre la variable en estudio (Reyna, Reyna, & Vines, 2017). DINAMICA utiliza dos funciones de autómatas celulares locales complementarios para la simulación, uno para la expansión o contracción de parches previos (Expander) y otra para la generación de nuevos parches a través de un mecanismo semilla (Patcher) (Mas et al., 2011). Para cada transición, el porcentaje de cambios realizados por Expander en relación con Patcher deben ser especificados. También se debe definir la isometría del parche, este es un parámetro entre 0 y 2, a medida que incrementa el parámetro más isométrico será el parche. El tamaño de los nuevos parches y de las franjas de expansión son definidas a partir de una distribución de probabilidad lognormal, por lo que se debe

especificar los parámetros de esta distribución como el tamaño medio del parche y su varianza (Silveira, Corradi, Coutinho, & Leite, 2003).

No existe un mecanismo concreto que permita especificar el tamaño medio del parche, su varianza e isometría, varios autores recomiendan la consulta a expertos para definir estos parámetros (Espinoza, 2016). Otra forma de obtener valores aproximados es mediante el cálculo de las medidas de la estructura del paisaje como la dimensión fractal, el índice de cohesión el parche y la distancia al vecino más cercano (Silveira, Corradi, Coutinho, & Leite, 2003).

- Dimensión Fractal

Indica la complejidad del parche, opera en un rango entre 1 y 2, el valor de 1 indica formas con perímetros muy simples, como un cuadrado. A medida que incrementa el índice y se acerca a dos las formas son más complejas. Dentro de la ecuación (7),  $p_{ij}$  hace referencia al perímetro del parche en metros ( $m$ ) y  $a_{ij}$  al área en metros cuadrados ( $m^2$ ) (McGarigal, 2015).

$$FRAC = \frac{2 \ln(.25 p_{ij})}{\ln a_{ij}} \quad (7)$$

- Índice de cohesión del parche

Indica el nivel de fragmentación del paisaje para cada clase y con esto la conectividad de la misma. Un mayor valor del índice indica menor fragmentación. En la ecuación (8),  $p_{ij}^*$  es el perímetro del parche  $ij$  en términos de número de celdas,  $a_{ij}^*$  el área en términos de número de celdas y  $Z$  es el número total de celdas en el paisaje (McGarigal, 2015).

$$COHESION = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{ij}^*}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{ij}^* \sqrt{a_{ij}^*}} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{Z}} \right]^{-1} \cdot (100) \quad (8)$$

- Distancia al vecino más cercano

Es una de las medidas más simples para cuantificar el aislamiento o dispersión de los parches e indica la distancia en metros al parche más cercano del mismo tipo o clase, el computo se realiza entre los centros de las celdas (McGarigal, 2015).

#### **f) Validación**

La validación del modelo se realiza mediante el cálculo de índices de similitud difusa, estos índices operan dentro de las zonas de cambio por lo que se determinan dos mapas de cambio: el primero es la comparación del mapa simulado con el mapa inicial (1) y el segundo es la comparación del mapa real observado con el mapa inicial (2). Después se analiza la coincidencia espacial entre los dos mapas (1 y 2) a diferentes niveles de tolerancia o tamaños de ventanas, este enfoque permite considerar la clasificación de las celdas vecinas y no únicamente la de la celda central a través de la ponderación de la distancia y la distribución de las celdas alrededor de la central (Leija et al., 2016).

La influencia del vecindario puede ser caracterizada mediante dos tipos de funciones de decaimiento: la primera utiliza un tamaño de ventana fija y una función de decaimiento exponencial y la segunda utiliza ventanas múltiples y una función de decaimiento constante, es decir, el peso de todas las celdas dentro de la ventana es igual a 1. El valor de la ventana debe ser siempre un número impar, para dar espacio a la celda central que será analizada (Espinoza, 2016)

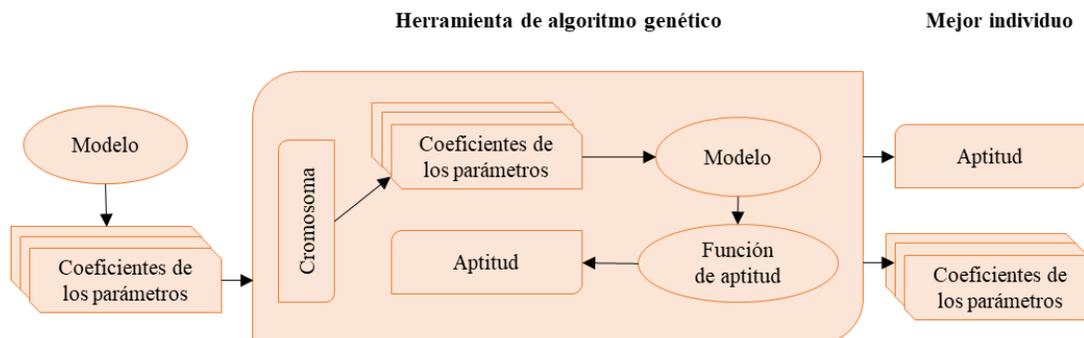
Como resultado se obtienen dos valores de similitud producto de la comparación de 1 con 2 y viceversa. Siempre se trabaja con el mínimo porcentaje de coincidencia para evitar resultados sobredimensionados de un ajuste artificialmente alto (Leija et al., 2016). Piontekowski et al. (2012)

citado en Espinoza (2016) considera que si los valores de similitud se encuentran por encima del 50% la validación es exitosa.

### **g) Optimización por algoritmos genéticos (AG)**

Los algoritmos genéticos son un conjunto de métodos numéricos de optimización inspirados en la genética biológica y en mecanismos de selección natural. De manera general un algoritmo genético consiste en una población de múltiples soluciones a un problema (individuos) que poseen un genoma que codifica distintos valores. Una función de adecuación evalúa el desempeño de cada individuo de la población en la resolución del problema y se selecciona a los dos mejores individuos (a y b). A través de un método de recombinación se genera una nueva solución c con fragmentos de los genomas de los individuos a y b, un operador de mutación modifica aleatoriamente los genomas para la creación de una nueva generación que será nuevamente evaluada por la función de adecuación hasta encontrar el individuo que tenga un mejor desempeño, para esto se utilizan criterios que permitan frenar la búsqueda, como un umbral de error aceptable o un número máximo de generaciones (Robredo, 2013; Shan , Alkheder, & Wang, 2008).

DINAMICA EGO posee un modelo para AG que incorpora la computación masiva y heurística en la obtención de una solución óptima de un conjunto de parámetros de un modelo, para esto se utilizan dos funciones principales: Get Current Individual and Set Fitness (Soares-Filho, Rodrigues, & Costa, 2009). La Figura 8 representa un esquema general del funcionamiento del algoritmo genético.



**Figura 8.** Diagrama de un algoritmo genético con sus entradas, salidas, modelo interno y funciones.

Fuente: (Soares-Filho, Rodrigues, & Costa, 2009)

Cada parámetro del modelo representa un alelo dentro de una tabla que corresponde a un gen, un conjunto de tablas es un cromosoma, este grupo de tablas es el genotipo que va a ingresar al modelo. La función Get Current Individual permite crear los individuos de una generación, los coeficientes de los parámetros de cada individuo ingresan al modelo que se desea optimizar, una función de evaluación a la salida del modelo permite obtener el desempeño de cada individuo. Este modelo se reproduce una vez por individuo, es decir, el modelo va a iterar  $g \times i$  veces, donde  $g$  es el número de generaciones e  $i$  el número de individuos por generación. El resultado de la validación pasa a la función Set Fitness que proporciona al modelo el rendimiento del mejor individuo para el proceso de selección (Soares-Filho, Rodrigues, & Costa, 2009).

### 2.3.2. Escenarios

Los escenarios son situaciones hipotéticas y lógicas del futuro formuladas para mostrar las consecuencias de diferentes procesos realizados en el presente, suelen presentar por lo general situaciones probables, posibles o deseables (Aguilera, Gómez, & Cantergiani, 2010). Se elaboran basándose en el comportamiento histórico de diferentes variables que son consideradas importantes y que al ser modificados cambian los escenarios proyectados dando como resultado un variado

número de escenarios alternos (Yerovi, 2016). Siguiendo este contexto Cely (1999) clasifica los escenarios como:

- Escenarios Posibles: es cualquier tipo de escenario sin importar si la su probabilidad de ocurrencia es alta o baja.
- Escenarios Realizables: son los escenarios que tienen ocurrencia es factible, tomando en cuenta las restricciones del sistema.
- Escenarios Deseables: son los escenarios a los que se desea alcanzar. Son escenarios posibles, pero no necesariamente realizables.

Por otra parte, acorde a los diversos modos de pensar a futuro Aguilera, Gómez, & Cantergiani (2010) clasifican los escenarios como:

- Los escenarios predictivos: permiten predecir lo que es probable en un plazo de tiempo corto. Debido a la dificultad de modelar procesos dinámicos tan complejos, como los sistemas urbanos (Aguilera Benavente, Valenzuela Montes , & Bosque Sendra, 2010) estos escenarios no son los más convenientes.
- Los escenarios exploratorios, muestran posibles imágenes de los crecimientos futuros generalmente en una escala temporal de medio plazo, en función de un conjunto de variables. Estos escenarios permiten explorar las consecuencias de la planificación actual y diferentes contextos socioeconómicos (Berdoulay, 2009).
- Los escenarios normativos permiten visualizar las metas deseables para el crecimiento urbano y los lineamientos necesarios para alcanzarlas (Cely, 1999).

En la práctica no existe un solo método de obtención de escenarios, sino varias formas de construirlos, sin embargo la metodología de escenarios plantea tres objetivos fundamentales, los cuales deben desarrollarse (Cely, 1999):

- Descubrir y vincular variables claves que caracterizan al sistema en estudio mediante un análisis explicativo global.
- Determinar a partir de las variables clave, los actores fundamentales y los medios de que disponen para concretar sus proyectos.
- Describir, en forma de escenarios, la posible evolución del sistema en estudio a partir de la observación y análisis de las variables claves y de los comportamientos de los actores, respecto a un juego de hipótesis.

Para lograr estos objetivos, la metodología de escenarios se desarrolla en etapas principales:

#### **a) Método de búsqueda de variables clave MICMAC**

Método que permite destacar variables claves para la evolución del sistema. Estimula la reflexión dentro del grupo, y hace que expertos analicen ciertos aspectos que algunas veces son poco intuitivos. Comprende 3 fases (Cervantes & Cedeño, 2014):

##### **a.1) Consideración de variables**

Consiste en inventariar todas las variables que caracterizan el sistema (variables externas e internas), requiere incluir a representantes de posibles actores del tema de estudio, quienes aportan a base de lluvia de ideas o entrevistas la mayor cantidad de variables. Finalmente es esencial

realizar una lista con la explicación detallada de las variables, ya que permitirá una mejor percepción de las relaciones entre estas variables en el análisis (Cervantes & Cedeño, 2014).

### **a.2) Descripción de la relación entre variables**

Radica en describir la red de relaciones entre las variables, utiliza una matriz de doble entrada llamada “matriz de análisis estructural”, que busca analizar el tipo de influencia que posee una variable sobre otra. Esta influencia puede ser directa de tipo fuerte (3), media (2), baja (1) o nula (0) cuando la variable A influye sobre la variable B, indirecta cuando A afecta a B y esta última afecta a una variable C, por lo que A afecta indirectamente a C. También puede existir influencia potencial (P) determinada por las relaciones de poder entre las variables (Cely, 1999).

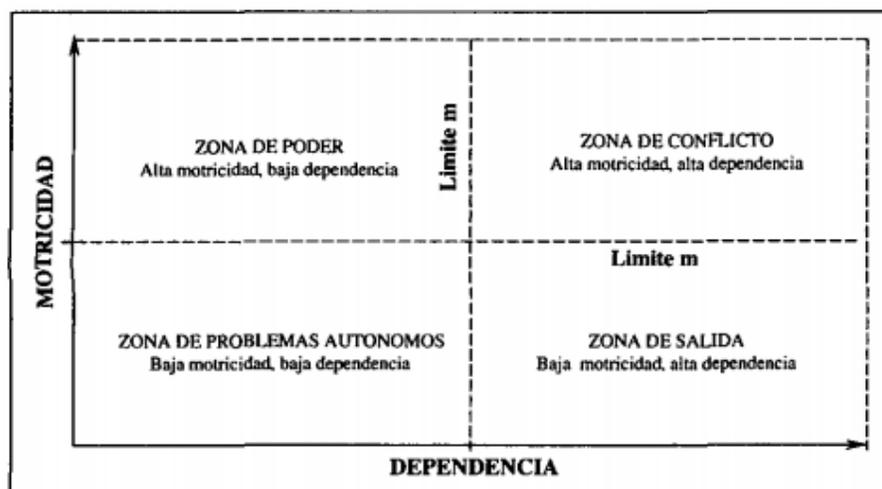
Únicamente las relaciones directas y potenciales se ingresan en la matriz, para determinar las influencias indirectas, la matriz de análisis estructural se eleva a una potencia  $n$  para evidenciar las relaciones de orden  $n$  entre las variables. La matriz se eleva hasta que su rango se vuelva constante, lo que por lo general sucede a partir de la cuarta o quinta potencia (Cely, 1999).

La sumatoria por filas de las matrices, indica el grado de influencia o motricidad de una variable sobre las demás y la sumatoria por columnas, indica el grado de dependencia de una variable respecto de las otras (Cervantes & Cedeño, 2014).

### **a.3) Identificación de las variables clave**

Se consigue gracias a la utilización del método análisis estructural, aplicando las clasificaciones directas, indirecta y potencial. Los resultados se pueden apreciar en un plano donde el eje de abscisas corresponde a la dependencia y el eje de las ordenadas a la influencia (Figura 9) (Cervantes & Cedeño, 2014). El límite  $m$  se calcula como  $100/n$ , siendo  $n$  el número de variables consideradas.

Las variables escogidas como claves son aquellas que se encuentran en la zona de conflicto y de poder (Cely, 1999).



*Figura 9.* Plano de dependencia vs influencia o motricidad  
Fuente: (Cely, 1999)

### b) Método análisis de juego de actores MACTOR

El Método de Actores, Objetivos, Relaciones de fuerza llamado “MACTOR”, es un método de análisis de los juegos de actores, busca estimar las relaciones de fuerza que existen entre los actores y permite estudiar las convergencias y divergencias con respecto a determinados retos y objetivos asociados con los actores (Cervantes & Cedeño, 2014).

### c) Método de impactos cruzados SMIC

El Método de Impactos Cruzados denominado “SMIC”, se basa en la evaluación de los cambios en las probabilidades de ocurrencia de un conjunto de hipótesis (escenarios). En “SMIC” los expertos deben calificar las probabilidades simples de ocurrencia del listado de hipótesis en un horizonte de tiempo dado. Las formas de calificación deben realizarse de acuerdo con la escala que se muestra en la Tabla 3 (Cely, 1999):

**Tabla 3***Escala de calificación de la probabilidad de ocurrencia de la hipótesis*

<b>Probabilidad</b>	<b>Significado</b>
0.9	Evento muy probable
0.7 - 0.8	Evento probable
0.5 - 0.6	Evento de dudosa ocurrencia
0.3 - 0.4	Evento improbable
0.1 - 0.2	Evento muy improbable

Fuente: (Cervantes &amp; Cedeño, 2014)

Para que no existan incoherencias en relación con las restricciones clásicas de las probabilidades, se deben respetar las siguientes condiciones (Cely, 1999):

$$a) 0 < P(i) < 1$$

$$b) P(i/j).P(j) = P(j/i).P(i) = P(i.j)$$

$$c) P(i/j).P(j) + P(i/\text{nonj}).P(\text{nonj}) = P(i)$$

El resultado de la aplicación del método SMIC al conjunto de hipótesis en estudio, proporciona un listado de probabilidades corregidas para cada uno de los escenarios. Para ello, se debe hacer un promedio de estas probabilidades. Finalmente se obtiene una clasificación ordinal de los escenarios posibles, que permitirá diferenciar los escenarios realizables (probabilidad de ocurrencia no nula) de los no realizables (probabilidad de ocurrencia nula o muy pequeña) (Cely, 1999).

## **2.4. Planificación Urbana**

La planificación urbana es un conjunto de instrumentos normativos y técnicos redactados para ordenar el uso de suelo y regular condiciones de su transformación o conservación, busca planificar de manera ordenada la estructuración espacial de una zona urbana, resultado de una evolución social, relacionada con un aumento de la densidad de población, que conlleva su expansión y

modificación en las demandas de uso de suelo (López, 2015). Requiere de un conocimiento del medio físico, social y económico para generar un modelo de ordenación en el ámbito espacial (Fernández, 2015).

#### **2.4.1. Normativa legal vigente**

Dentro de la base legal esta la actual Constitución del Ecuador del año 2008 que incorpora el desarrollo del primer sistema nacional de planificación. El artículo 241 dice que “la planificación garantizará el ordenamiento territorial y será obligatoria en todos los gobiernos autónomos descentralizados”. Específicamente la planificación del desarrollo cantonal está a cargo de los gobiernos municipales; dentro de su régimen de competencias, el artículo 264 menciona que los gobiernos municipales deberán “Planificar el desarrollo cantonal y formular los correspondientes planes de ordenamiento territorial...con el fin de regular el uso y la ocupación del suelo urbano y rural”, además de “ejercer el control sobre el uso y ocupación del suelo en el cantón”.

Dentro del Reglamento a la Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión de Suelo (LOOTUGS) del decreto No. 680 se establecen procedimientos y lineamientos para la aplicación de los instrumentos de gestión, uso y planificación establecidos. De esta manera el artículo 16 de esta ley habla acerca de la delimitación del suelo rural de expansión urbana, cuya determinación depende de diversos factores como las proyecciones de crecimiento que pueden verse apoyadas por un análisis del crecimiento del uso de suelo urbano para brindar a las autoridades municipales un sustento en la planificación del territorio. Por otra parte, en el artículo 19 de esta ley se menciona la normativa urbanística que contempla la determinación de “zonificación de usos, ocupación del suelo, densidades, aprovechamiento e intensidad de la ocupación”.

En este sentido el GAD Municipal de Ibarra (2015) en su ordenanza “Ordenanza de Uso y Ocupación del Suelo del Cantón Ibarra” establece la zonificación del suelo urbano y en su artículo 12 determina que esto “obedecerá a imperativos de desarrollo urbano, como los de contrarrestar la especulación de precios de compraventa de terrenos, evitar el crecimiento desordenado de la urbe y facilitar la reestructuración parcelaria y la aplicación racional de soluciones urbanísticas”.

Este documento también establece en el artículo 204 la obligación de los proyectos para respetar el uso del suelo y forma de ocupación. Esto da una pauta para el correcto desarrollo del cantón, al restringir la ubicación de proyectos a un suelo apropiado para su ejecución.

#### **2.4.2. Uso de suelo**

La clasificación del uso de suelo facilita de manera general la toma de decisiones y la realización de estrategias territoriales considerando aspectos sociales, económicos, culturales y ambientales de los diferentes tipos de suelo (Delgado, Toledo, Quinde, & Vélez, 2017).

Es así como en la Ordenanza que reglamenta el uso y ocupación del suelo del cantón Ibarra, acorde a la Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión del Suelo (LOOTUGS) se define la clasificación del suelo como:

##### **2.4.2.1. Suelo urbano**

El suelo urbano se define como el ocupado por asentamientos humanos concentrados que tienen una dotación parcial o total de infraestructura básica y servicios públicos. Los asentamientos urbanos pueden tener diferentes escalas y se debe considerar que pueden existir núcleos urbanos en suelo rural (LOOTUGS, 2016). Los suelos urbanos especificados son:

- Suelo urbano consolidado: es el que tiene la totalidad de los servicios, equipamientos e infraestructura, y que se encuentra ocupado por edificaciones casi en su totalidad.
- Suelo urbano no consolidado: es el que no tiene la totalidad de servicios, equipamientos e infraestructuras necesarios, y que se encuentra ocupado por edificaciones casi en su totalidad.
- Suelo urbano de protección: debe ser protegido debido a sus especiales características biofísicas, culturales, sociales, paisajísticas, o factores de riesgo para la población, en este tipo de suelo se restringe la ocupación.

#### **2.4.2.2. Suelo Rural**

El suelo rural está aquel destinado a la ejecución actividades agro productivas, extractivas o forestales principalmente, o a la protección de los usos urbanos, por sus características biofísicas o geográficas (LOOTUGS, 2016). Estos suelos son:

- Suelo rural de producción: Es el suelo apto para actividades agro productivas, acuícolas, ganaderas, forestales y de aprovechamiento turístico. Se encuentra restringida la construcción y el fraccionamiento.
- Suelo rural para aprovechamiento extractivo: Es el suelo rural destinado a las actividades extractivas de recursos naturales no renovables autorizado por las autoridades y acorde a la legislación actual.

- Suelo rural de expansión urbana: es el suelo rural destinado al uso urbano en un futuro conforme al plan de uso y gestión de suelo. Este suelo debe ser colindante con el suelo de tipo urbano.
- Suelo rural de protección: debe ser protegido por sus especiales características biofísicas, ambientales, paisajísticas, socioculturales, o por presentar factores de riesgo, merecen medidas específicas de protección. No es suelo apto para realizar ningún tipo de actividad, por lo que se encuentra restringida la construcción y el fraccionamiento.

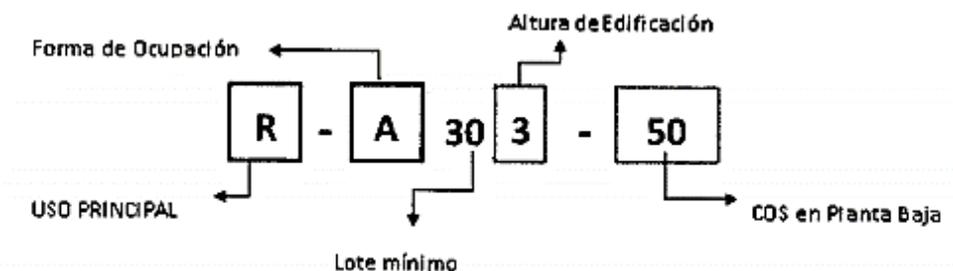
### **2.4.3. Plan de Uso y Ocupación del Suelo**

El Plan de uso y ocupación del suelo (PUOS) es un instrumento enfocado a la gestión y planificación territorial, de carácter normativo, ya que establece normas y parámetros específicos que regulan el uso, ocupación, habilitación y edificación del suelo en un territorio, se estructura a partir de los siguientes sistemas: usos de suelo, zonificación (coeficientes y formas de ocupación, volumen y altura de edificación), forma de fraccionamiento del suelo, las áreas de afectación y protección especial (Municipio DMQ, 2003). Es fundamental para ordenar el crecimiento urbano, que conlleven a lograr una urbe organizada que garantice el bienestar de sus habitantes (GAD Municipal San Miguel de Ibarra, 2019).

### **2.4.4. Zonificación del suelo**

La zonificación del suelo permite ordenar las actividades antrópicas en el territorio mediante la creación de zonas homogéneas que poseen una codificación (Figura 10) con respecto al uso de suelo, además del uso, la zonificación incluye también factores como la forma de ocupación,

intensidad ocupación de uso y el área en que se puede fraccionar el suelo, alturas de edificación y retiros. (Herrera, 2011).



**Figura 10.** Codificación para establecimiento de zonas homogéneas

Fuente: (GAD Municipal Ibarra, 2015)

#### 2.4.4.1 Usos de suelo

La asignación de usos de suelo permite lograr un análisis más detallado la dinámica del territorio, ya que estos constituyen un reflejo de la actividad antrópica en el territorio y por ende contribuyen a la creación de normativa, que regulen las diferentes actividades (Delgado, Toledo, Quinde, & Vélez, 2017). El GAD Municipal Ibarra (2015), determina los usos de suelo más específicos y relacionados a las actividades económicas y a la ubicación geográfica del territorio, ya sea en sector urbano o rural.

#### 2.4.4.2. Forma de ocupación del suelo

El GAD Municipal Ibarra (2015) establece cinco formas de implantación:

- Aislada (A): Las edificaciones no están adosadas a ningún lado.
- Pareada (B): Las edificaciones están adosadas a uno de los dos lados.
- Continua (S): Las edificaciones están adosadas a los dos lados.
- Sobre línea de fábrica (D): Las edificaciones están adosadas a sus dos lados y hacia la calle.

- Codificación de áreas históricas y patrimoniales (CH).

#### **2.4.4.3. Intensidad de ocupación del suelo**

La ocupación del suelo puede ser expresando mediante coeficientes máximos de utilización del suelo:

- COS: o coeficiente de ocupación del suelo, es relación entre la superficie máxima del suelo ocupada por edificación y la superficie del predio (Herrera, 2011).
- COS\_T: o coeficiente de utilización del suelo, es la relación entre la superficie cubierta máxima edificada (suma de todas las áreas cubiertas en cada planta sobre el nivel de la cota del predio) y la superficie del predio (GAD Municipal Ibarra, 2015).

#### **2.4.4.4. Lote mínimo**

Superficie mínima a la que un lote se puede fraccionar (Herrera, 2011).

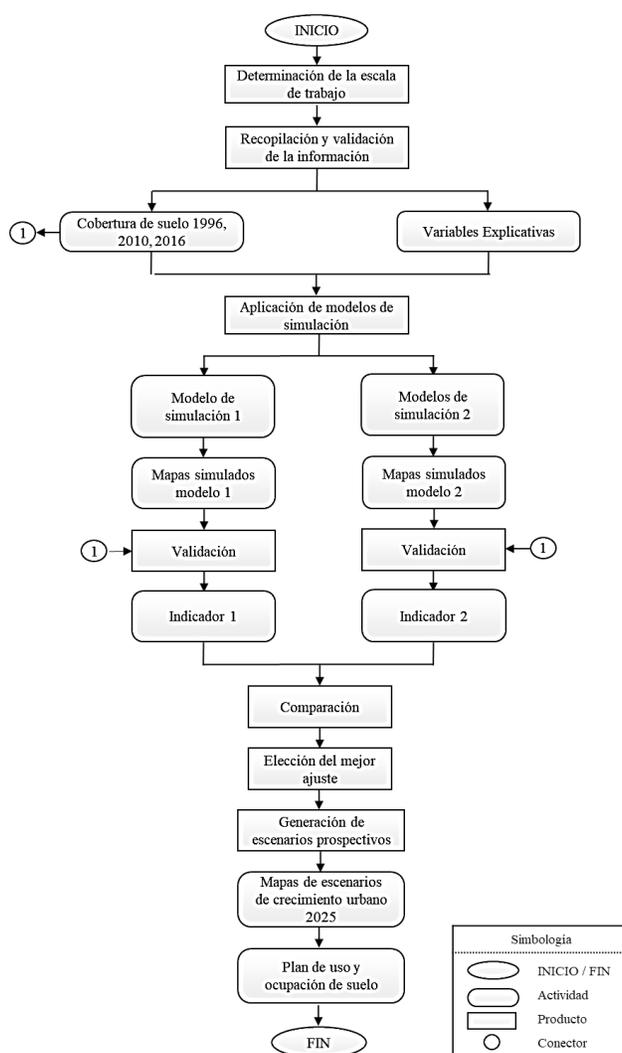
#### **2.4.4.5. Altura de edificación**

La altura de edificación se reglamenta con la finalidad de modelar el crecimiento vertical de la ciudad, esta medida en número de pisos (Herrera, 2011).

## CAPITULO III

### 3. METODOLOGÍA

En el presente capítulo, se realiza una descripción en forma secuencial de los procesos desarrollados para la modelación del crecimiento urbano en el cantón Ibarra al año 2025, a partir de un conjunto de variables explicativas, con fines para planificación de uso y ocupación del suelo. A continuación (Figura 11) se presenta un esquema gráfico de la metodología utilizada:



**Figura 11.** Diagrama de procesos para el modelamiento del crecimiento urbano en el cantón Ibarra al año 2025

### 3.1. Zona de estudio

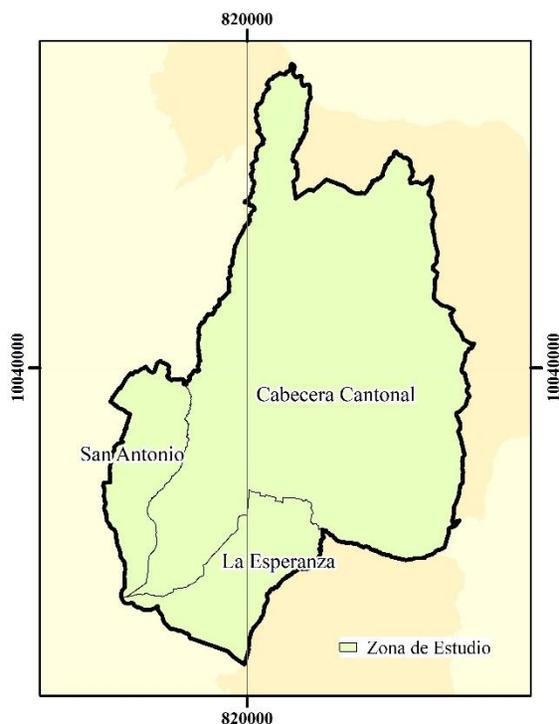
El presente proyecto se desarrolla en el cantón Ibarra, se centra específicamente en la cabecera cantonal y las parroquias rurales San Antonio y La Esperanza, que según el Censo de Población y Vivienda 2010, son las tres parroquias con mayor población en el cantón (Tabla 4), puesto que, del total de habitantes, un 77,12% se asienta en la cabecera cantonal, un 9,67% en San Antonio y un 4,06% en La Esperanza, conformando conjuntamente así el 90,85% de la población total del cantón.

**Tabla 4**  
*Censo de Población y Vivienda 2010 cantón Ibarra*

Parroquia	Población	Porcentaje (%)
Ibarra	139.721	77,12
San Antonio	17.522	9,67
La Esperanza	7.363	4,06
Ambuqui	5.477	3,02
Lita	3.349	1,85
Angochagua	3.263	1,80
Carolina	2.739	1,51
Salinas	1.741	0,96
Total	181.175	100

Fuente: (INEC, 2010)

Estos datos demuestran la existencia de una mayor demanda de servicios básicos, vivienda, empleo por parte de la población y que la mayoría de proyectos de infraestructura e instituciones públicas y privadas se concentren en estas tres parroquias, reflejando así la presencia de áreas urbanas. Además, cabe mencionar que las parroquias rurales San Antonio y la Esperanza tienen una conexión cercana con la ciudad de Ibarra, ubicada en la cabecera cantonal (Figura 12).



**Figura 12.** Zona de estudio

### **3.2. Recopilación, generación y validación de la información**

Los insumos de entrada para la generación de los modelos de simulación de crecimiento urbano, comprenden capas de información de uso de suelo donde se diferencie el uso urbano (2) del no urbano (1), y de vías para tres épocas distintas de la zona de interés, también cartografía de las variables consideradas determinantes para explicar el crecimiento urbano.

Al no contar con las capas de uso de suelo urbano (2) y no urbano (1) de las épocas referidas, se procedió a generar dicha información, para ello se tomó como base la capa de catastro predial del año 2016, proporcionada por el GAD de Ibarra, y en base a dos ortofotos de los años 1996 y 2010, facilitadas por el Instituto Geográfico Militar (IGM), y SIGTIERRAS, respectivamente y

una imagen de alta resolución del año 2016 del Google Earth descargada del software SASplanet, se procedió a depurar la mancha urbana para los tres años.

De igual manera tomando como base la capa de vías del año 2010 facilitada por el GAD de Ibarra, y mediante fotointerpretación de las ortofotos de los años 1996 y 2016, se generaron las vías para los tres años. Cabe mencionar que no se pudo obtener una ortofoto del año 2006, razón por la cual se procedió a utilizar una del año 2010, tampoco los catastros propios de cada año, por lo que se utilizó como base el del año 2016.

Para las variables explicativas, se tomaron en cuenta equipamientos de recreación como áreas verdes, estadios, y equipamientos comerciales como mercados, se seleccionaron los predios correspondientes del catastro en base a fotointerpretación de la imagen del año 2016. En cuanto a equipamientos de educación y salud, se realizó el mismo procedimiento, pero se utilizó como apoyo capas de información del Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE) del año 2016.

Además, se tomaron en cuenta un modelo digital de elevación proporcionado por el SIGTIERRAS del año 2010 de resolución 3 m, y en base al mismo se obtuvo un mapa de pendientes, también se tomó en cuenta una capa de ríos del año 2010 y capas de movimientos en masa y riesgo de inundación del año 2010 proporcionadas por el GAD de Ibarra. Cabe mencionar que los insumos proporcionados y generados para el estudio estuvieron a una escala 1:5000.

### **3.2.1. Generación de la Geodatabase**

Una geodatabase o base de datos espacial, como parte del SIG soporta el almacenamiento físico de geoinformación, donde sus datos espaciales se tratan como un tipo de dato *geometry* que guarda la ubicación del objeto y sus atributos (datos no espaciales), de hecho, deben tener asociado un

sistema de referencia espacial, y de tipo raster y alfanumérico. Según Zeiler (1999) citado en Zanipatín (2014) los componentes de una geodatabase son: *datasets*, *feature classes* y *raster dataset*, donde:

***Feature class***: colección de objetos con el mismo tipo de geometría: punto, línea o polígono.

***Feature dataset***: colección de *feature classes* que comparten un sistema de coordenadas común.

***Raster dataset***: pueden ser dataset simples o compuestos con múltiples bandas para distintos espectros o valores categóricos.

Las capas de información seleccionadas y cartografiadas para conformar la geodatabase, fueron clasificadas en forma estratégica de acuerdo a las temáticas de interés en el modelamiento del crecimiento urbano, y agrupadas en 5 *datasets*, con su geometría correspondiente. Además, el sistema de coordenadas asignado a los *datasets* corresponde al WGS84, dado que la información cartográfica del Cantón Ibarra tiene establecido este sistema. La estructura de cada uno de los *datasets* se detalla a continuación (Figura 13):

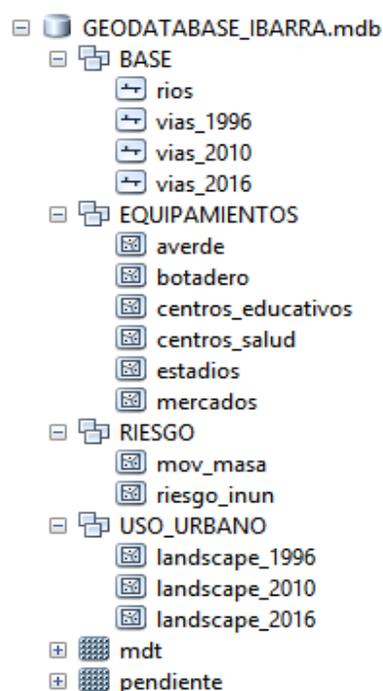
**Base**: Este *dataset* contiene cuatro *feature class*, con información referente a cartografía base como hidrografía (ríos) y vías de los años 1996, 2010 y 2016 a escala 1:5000.

**Uso urbano**: Este *dataset* contiene cuatro *feature class*, con información referente a división parroquial del cantón Ibarra y las coberturas de uso de suelo urbano (2) y no urbano (1) de los años 1996, 2010 y 2016 a escala 1:5000.

**Equipamientos**: Este *dataset* contiene seis *feature class*, con información referente equipamientos de interés que determinen el crecimiento urbano como botadero, centros de salud, mercados, centros educativos, áreas verdes y estadios a escala 1:5000.

**Riesgo:** Este *dataset* contiene dos *feature class*, con información referente al tema de riesgos en la zona de estudio, como movimientos en masa y riesgo a inundación.

Además, se crearon dos *raster dataset* que contienen información referente a aptitud de la zona de estudio, como el modelo digital de elevaciones (MDE) y la pendiente.



**Figura 13.** Geodatabase

### 3.3. Escala

La escala de los insumos generados y proporcionados por el GAD Municipal de Ibarra es 1:5000. Sin embargo, debido a que la variable temática que se desea cartografiar es el crecimiento urbano es necesario definir la escala de trabajo donde influyen la extensión de la zona de estudio (cabecera cantonal, y parroquias rurales San Antonio y la Esperanza), y el hecho de que los modelos de simulación utilizan información en formato raster.

Para definir una resolución adecuada en un raster, una metodología apropiada según Hengl (2006) consiste tomar en cuenta el tamaño del objeto espacial más pequeño a estudiarse, a esto se le añade el enfoque de McBratney, Mendoc-a, Minasny, B (2003) citado en Hengl (2006), donde sugieren al menos 2x2 celdas para representar el objeto más pequeño de interés y al menos 2 celdas para representar el ancho de objetos alargados.

Tomando como base estos criterios y los valores de lote mínimo registrados en el Art. 117. Zonificación y compatibilidad de usos del suelo cantonal que consta en la Ordenanza que reglamenta el uso y ocupación del suelo en el cantón Ibarra (2015), se define entonces que el menor valor registrado para un lote mínimo es de 400 m<sup>2</sup>, el cual representaría el tamaño del objeto espacial más pequeño de interés para este estudio, y con lo que se define un tamaño de celda de 10 metros.

### **3.4. Análisis multitemporal**

Para cuantificar el crecimiento del área urbana a través del tiempo se tomaron como insumos las capas de uso urbano de los años 1996, 2010 y 2016 generadas previamente. Se calculó el área total ocupada por los predios urbanos para cada año y se determinó el porcentaje de crecimiento que aportaron las parroquias urbanas y rurales del área de estudio.

Después se realizó una comparación entre la capa de uso urbano del año 2016 con la capa de uso actual del suelo del año 2010 del PD y OT del cantón para determinar que usos se vieron afectados por el crecimiento urbano en el periodo 2010-2016 y en qué proporción se redujo el área de estos usos.

### 3.5. Calibración de modelos multivariable

#### 3.5.1. Selección de variables

El ajuste de los modelos a la realidad depende en gran medida de la capacidad de las variables para explicar los cambios producidos a través del tiempo. De esta manera, se pueden clasificar las variables de diferentes maneras, Cifuentes & Londoño (2010) catalogan las variables del crecimiento urbano como naturales, de distancia a elementos relevantes y de urbanización, estas dos últimas clases son considerados por Aguilera (2006) como una sola categoría de proximidad, en tiempo (accesibilidad) y físicas (zonas urbanas). Díaz & Hewitt (2013) siguen un enfoque similar pero más generalizado al clasificar las variables como aptitud (variables biofísicas) y socioeconómicas (relacionadas a las actividades antrópicas sobre el territorio), además estos autores consideran que de 6 a 15 variables son apropiadas para realizar un estudio de CCUS, el número de variables escogidas dependerá también, de la existencia y disponibilidad de información cartografiada.

Las variables seleccionadas para el crecimiento urbano de Ibarra (Tabla 5) se catalogaron siguiendo la clasificación de Díaz & Hewitt (2013), además fue necesario indicar si las variables cambian a través del tiempo, es decir, si son estáticas o dinámicas y también si son de tipo categórico o continuo.

**Tabla 5**  
*Variables consideradas en los modelos multivariabes*

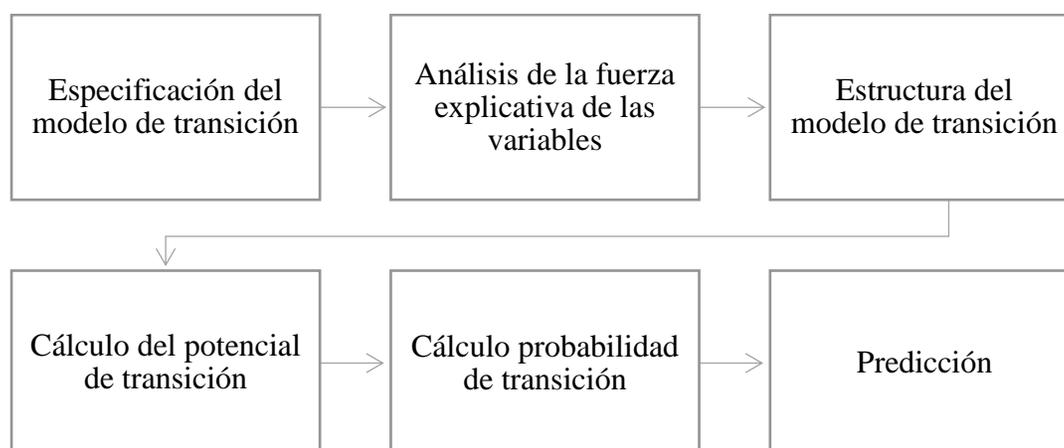
Clasificación	Variable	Tipo
Aptitud	Altura	Estática/Continua
	Pendiente	Estática/Continua
	Distancia a ríos	Estática/Continua
	Movimientos en masa	Estática/Categórica
	Riesgo a inundación	Estática/Categórica

**CONTINÚA →**

Socioeconómicas	Distancia al uso urbano	Dinámica/Continua
	Distancia a vías	Dinámica/Continua
	Distancia a botadero	Estática/Continua
	Distancia a centros de salud	Estática/Continua
	Distancia a mercados	Estática/Continua
	Distancia a centros educativos	Estática/Continua
	Distancia a áreas verdes	Estática/Continua
	Distancia a estadios	Estática/Continua

### 3.5.2. LCM basado en Redes Neuronales

El modelo de crecimiento urbano se dividió en seis tareas principales (Figura 14):



**Figura 14.** Modelo de simulación de crecimiento urbano de Ibarra en LCM

#### 3.5.2.1. Modelo de transición

Para generar el modelo de transición es necesario ingresar los mapas de uso urbano de los años 1996 (inicial) y 2010 (final), donde al ser comparados, se analizan las transiciones existentes entre sus categorías, en este caso existe una única transición del uso no urbano (2) a urbano (1), la cual es asignada a un modelo específico de transición denominado NOURB\_TO\_URB en el panel *Transition Sub-model: Status* (Figura 15)

	From :	To :	Sub-Model Name :
Yes	NO URBAND	URBAND	NOURB_TO_URB

Include all      **To group sub-models, give them a common name**

Include none      Sub-Model to be evaluated : NOURB\_TO\_URB

**Figura 15.** Modelo de transición

### 3.5.2.2. Análisis de la fuerza explicativa potencial de las variables

En este proceso a cada una de las 13 variables explicativas (Tabla 5) que intervienen en el modelo de transición NOURB\_TO\_URB (1 a 2) se les aplicó un test de correlación denominado V de Cramer, con el fin de obtener una medida cuantitativa de asociación que indique si el valor explicativo potencial de la variable es bueno en relación con el uso urbano. Para ello en el panel *Test and Selection of Site and Driver Variables* se especifica la variable a evaluar, se prueba su poder explicativo, y su resultado es presentado en una tabla de contingencia de 2x2, con el valor resultante para V de Cramer y p, producto del análisis de asociación, dependencia entre la variable y el uso urbano (Figura 16).

Evaluate : dist\_averde

Cover Class :	Cramer's V :	P Value :
Overall V	0.6335	0.0000
NO URBAND	0.6335	0.0000
URBAND	0.6335	0.0000

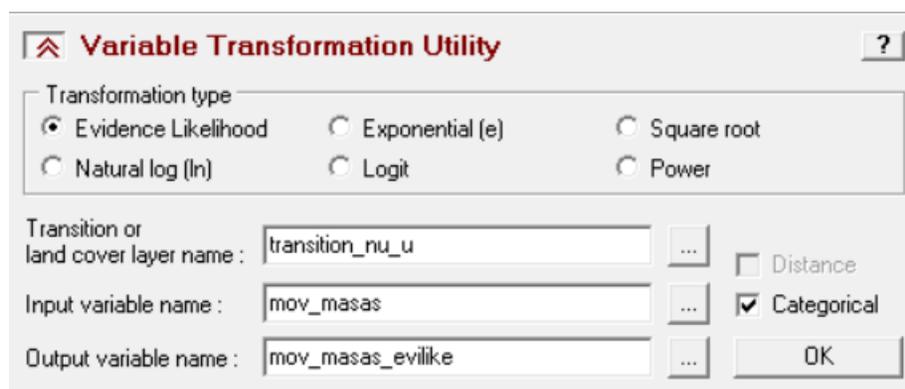
Test Explanatory Power

Add to Model

**Figura 16.** Prueba V de Cramer para la variable distancia a áreas verdes

### 3.5.2.3. Estructura del modelo de transición

En la estructura del modelo de transición NOURB\_TO\_URB, no urbano (2) a urbano (1), es necesario especificar las 13 variables explicativas a ser evaluadas en el cálculo de potencial de transición, sin embargo para el caso de las variables categóricas, previo a ser integradas a la estructura del modelo, fue necesario aplicar la transformación *evidence likelihood* del panel *Variable Transformation Utility*, donde a más de ingresar la variable categórica que se desea transformar, se requiere incorporar el mapa de transición que se presentó desde (1) a (2) en el periodo de 1996-2010. Según Eastman (2012) esta transformación es opcional, pero permite que las variables categóricas explicativas estén linealmente relacionadas con el potencial para la transición, en caso de falta de linealidad fuerte (Figura 17). Finalmente, las 13 variables explicativas son ingresadas en el panel *Transition Sub-Model Structure*, conformando así la estructura del modelo (Figura 18).



**Variable Transformation Utility** [?]

Transformation type

Evidence Likelihood     Exponential (e)     Square root

Natural log (ln)     Logit     Power

Transition or land cover layer name :  ...

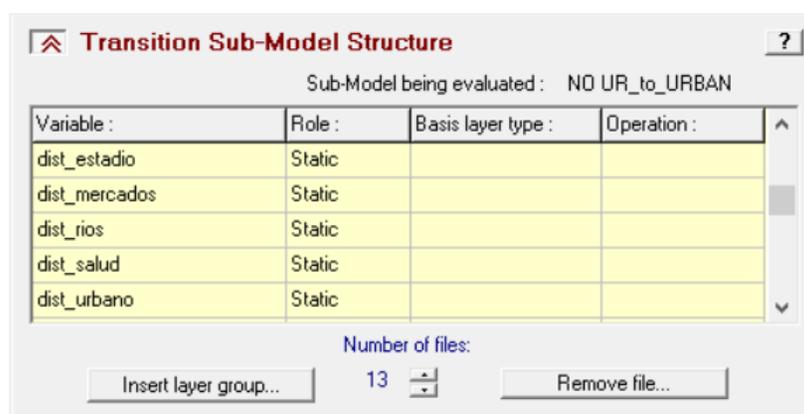
Input variable name :  ...

Output variable name :  ...

Distance     Categorical

OK

**Figura 17.** Transformación de la variable movimiento de masas



**Figura 18.** Estructura del modelo de transición

### 3.5.2.4 Cálculo del potencial de transición

Para el cálculo de los valores de potencial de transición, se utilizó la red neuronal artificial Perceptrón Multicapa (MLP) basada en el algoritmo de entrenamiento supervisado Backpropagation (BP), incorporada en LCM y que según Díaz & Hewitt (2013) define las reglas y patrones de cambio (elemento clave del modelo), estableciendo las áreas (células) que podrán ser ocupadas por el uso que se desea modelar (urbano).

El MLP utilizó parámetros de entrenamiento en modo automático y una velocidad de aprendizaje dinámica, que monitorea y modifica la velocidad de aprendizaje inicial (0,01) y final (0,001), y a la inicial la reduce hasta llegar a la final cuando se llega al máximo número de iteraciones (10000) respectivamente. Si existen variaciones altas del error RMS pasadas las 100 iteraciones, estas velocidades de aprendizaje (inicial y final), se reducen a la mitad y el proceso inicia otra vez. Según Eastman (2012) los demás parámetros no necesitan ser modificados y son usados en los valores normales por defecto que se presentan en el panel *Run Transition Sub-Model* (Figura 19).

**Run Transition Sub-Model**

MLP Neural Network   
 SimWeight   
 Logistic Regression

Minimum cells that transitioned from 1996 to 2010 : 116092  
Minimum cells that persisted from 1996 to 2010 : 2701089  
Sample size : 116092 (50% training / 50% testing)

MLP neural network parameters

Training parameters

Use automatic training  
 Use dynamic learning rate

Start learning rate : 0.01  
End learning rate : 0.001  
Momentum factor : 0.5  
Sigmoid constant a : 1.0  
Layer 1 nodes : 5

Error monitoring

— Training RMS — Testing RMS

1.00  
0.80  
0.60  
0.40  
0.20  
0.00

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Stopping criteria

RMS : 0.01  
Iterations : 10000  
Accuracy rate : 100 %

Running statistics

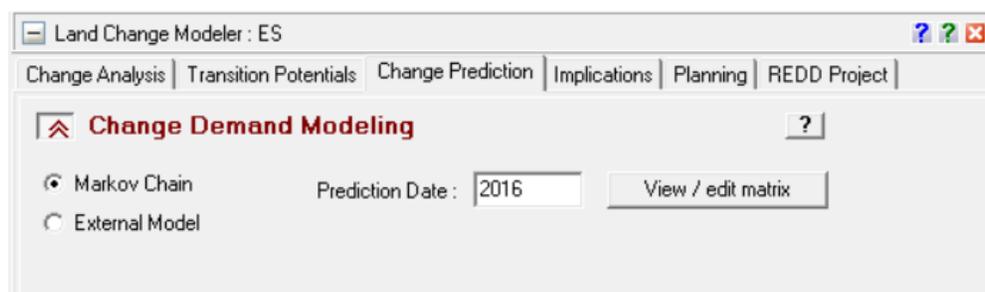
Iterations : 0  
Learning rate : 0.01  
Training RMS : 1.00  
Testing RMS : 1.00  
Accuracy rate : 0.00%

Run Sub-Model    Stop    Create Transition Potential

**Figura 19.** Parámetros de la red neuronal MLP

### 3.5.2.5. Cálculo probabilidad de transición

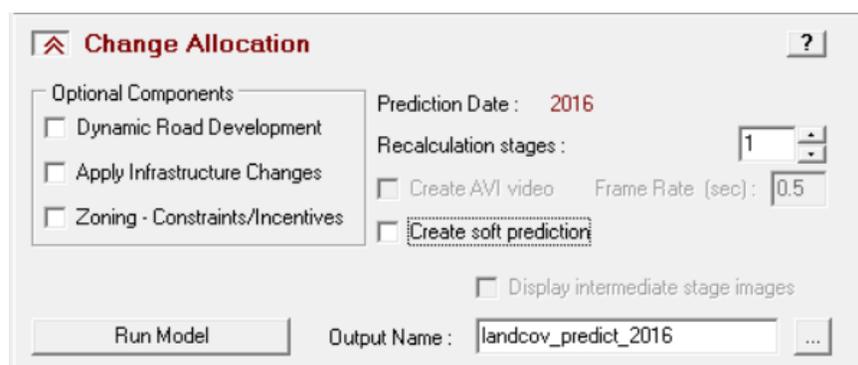
Este procedimiento se realiza por medio de la Cadena de Markov (*Markov Chain*), un proceso en el cual según Eastman (2012) se determina el estado futuro de un sistema, en base al conocimiento de su estado anterior y su probabilidad de transición a otro estado, en base a los mapas de uso urbano de años anteriores (1996 y 2010) se determina la cantidad que se espera realice la transición, no urbano (2) a urbano (1), desde la última fecha (2010) a la fecha de predicción (2016) basándose en una proyección de potenciales de transición, para finalmente obtener la probabilidad de transición. Para llevar a cabo esto en el panel *Change Demand Modeling* (Figura 20) se especifica como método la cadena de Markov y se ingresa la fecha de predicción (2016).



**Figura 20.** Panel *Change Demand Modeling*

### 3.4.2.6. Predicción

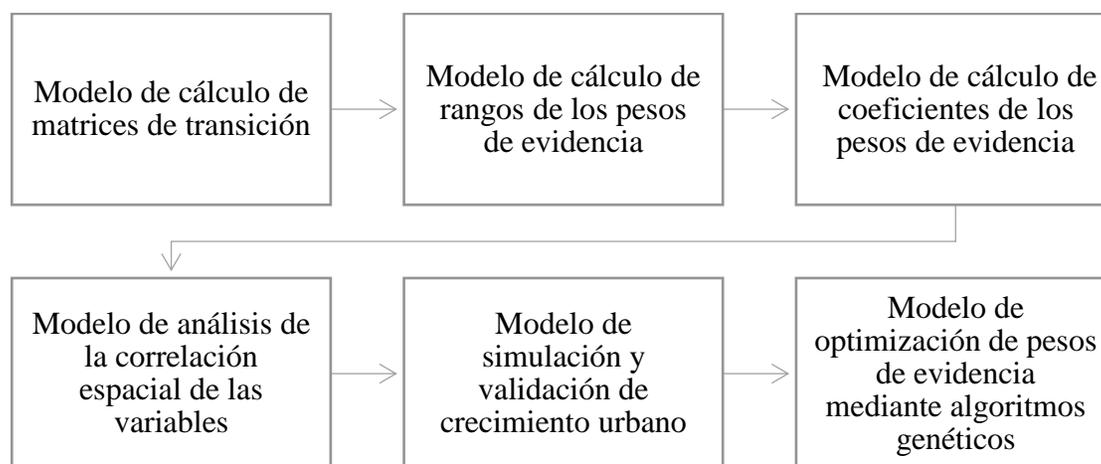
Con el modelo calibrado para el periodo 1996-2010 se procede a la predicción, cabe mencionar que no es posible obtener el mapa simulado del año 2010 debido a que este se mantiene constante, la predicción se realiza únicamente para años posteriores. Para esto se utilizaron el mapa potencial de transición obtenido del panel *Run Transition Sub-Model* y la fecha de predicción (2016) establecida en el panel *Change Demand Modeling*. Se genera una predicción dura para el año 2016 (Figura 21), resultado de una asignación multi-objetiva denominada MOLA (*Multi-objective Land Allocation*), que asigna una localización a cada pixel en la clase demandante (uso urbano) en base a su potencial de transición.



**Figura 21.** Probabilidad de transición

### 3.5.3. Autómatas celulares

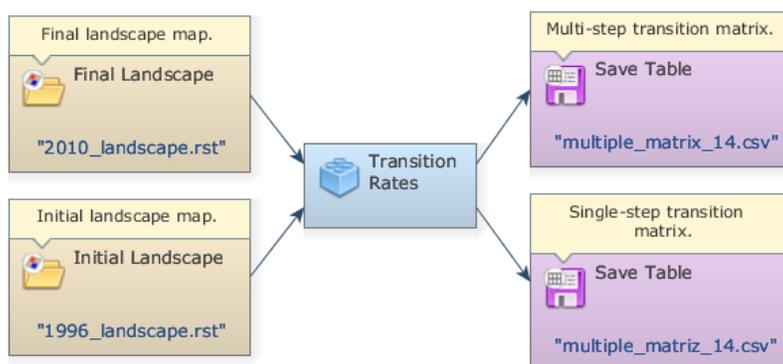
El modelo de crecimiento urbano para el cantón Ibarra se dividió en distintos submodelos (Figura 22).



**Figura 22.** Modelo de simulación de crecimiento urbano de Ibarra en DINAMICA

#### 3.5.3.1. Modelo para el cálculo de matrices de transición

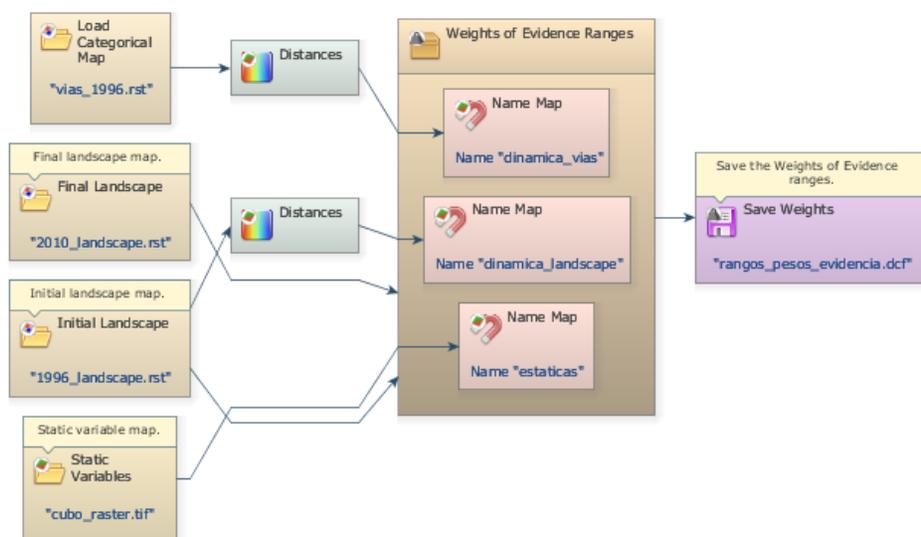
Para realizar el modelo del cálculo de las matrices de transición (Figura 23) se requirió como insumos los mapas categóricos del uso urbano de los años 1996 (inicial) y 2010 (final) que ingresan a la función *Determinante Transition Matrix*, donde se especificó el número de años que transcurrieron entre los mapas de uso inicial y final, esto para obtener la matriz de transición múltiple, el resultado del modelo se conecta a dos tablas donde se almacenan las matrices de transición simple y múltiple.



**Figura 23.** Modelo de cálculo de matrices de transición.

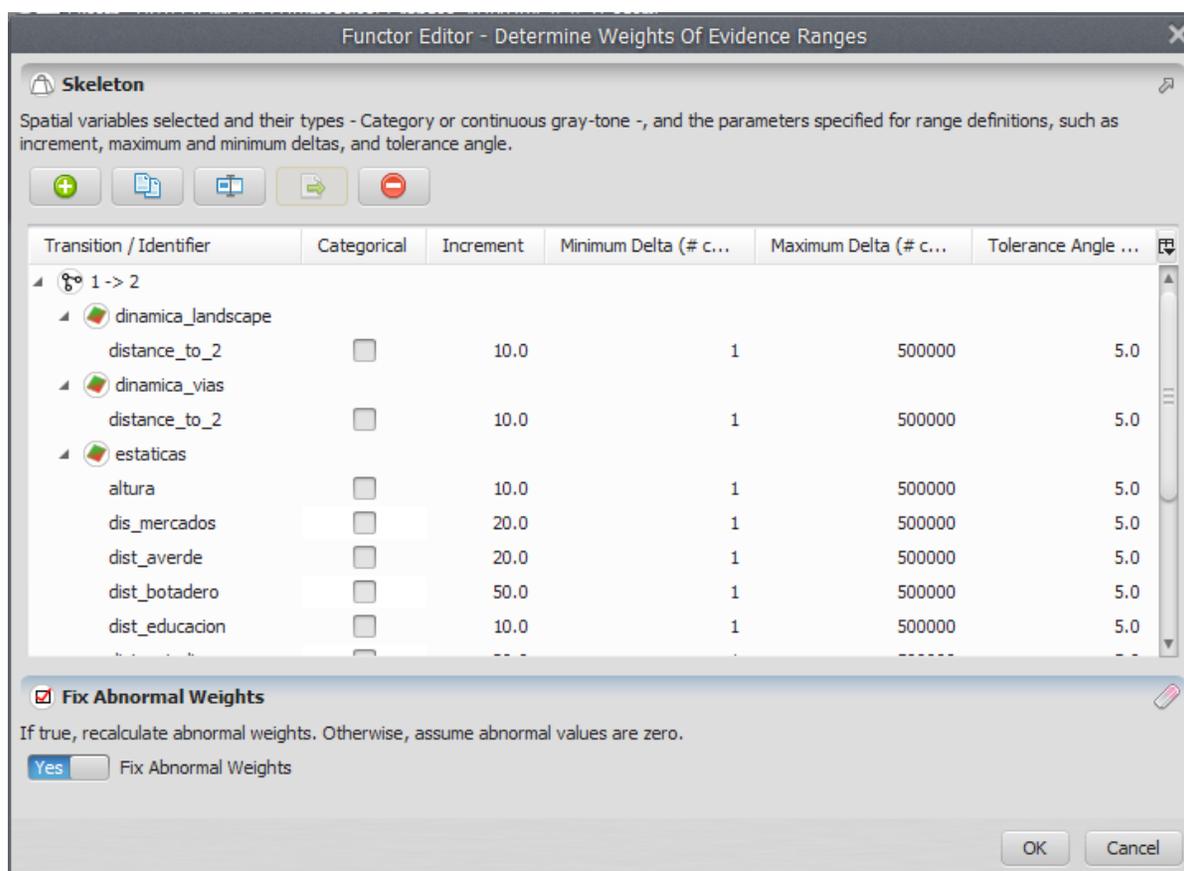
### 3.5.3.2. Modelo para el cálculo de rangos de los pesos de evidencia.

En el modelo para el cálculo de rangos de los pesos de evidencia (Figura 24) los insumos fueron los mapas de uso inicial y final, las variables dinámicas representadas por sus mapas en la época inicial y las variables estáticas introducidas como un cubo raster donde todas las variables debían estar homogenizadas con respecto al número de filas y columnas y el valor que se considera nulo. El resultado de este modelo son los rangos para determinar los pesos de evidencia de cada variable.



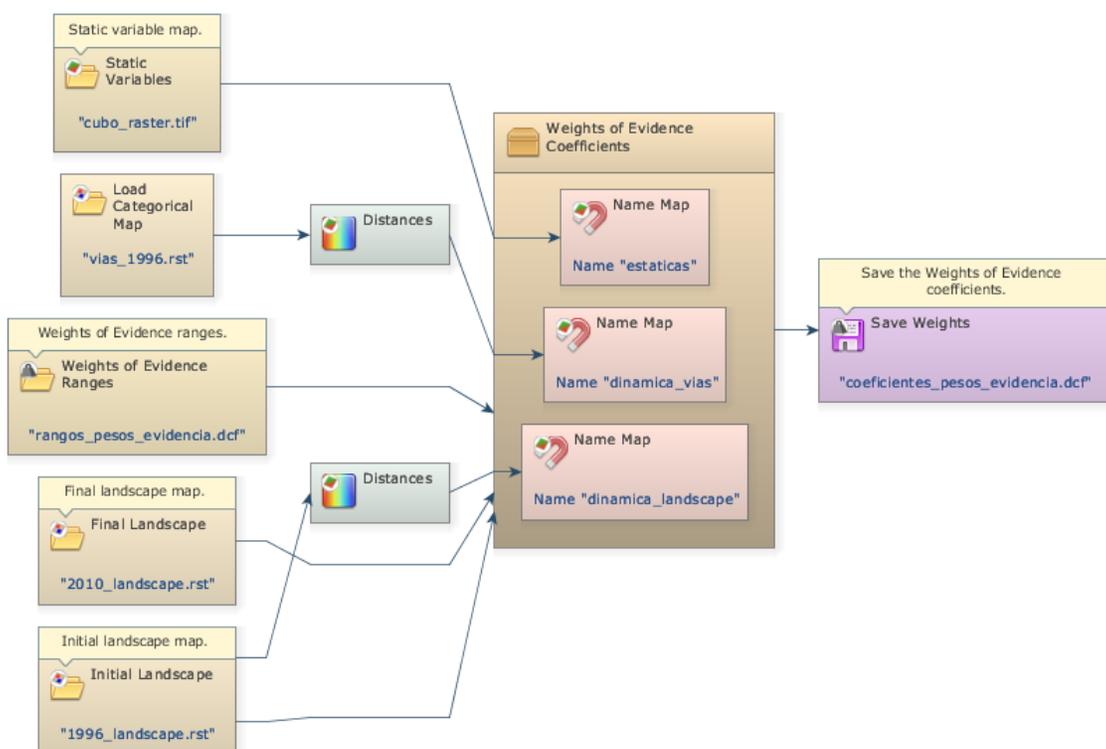
**Figura 24.** Modelo de cálculo de matrices de transición.

Todos estos insumos se conectaron a la función *Determine Weights Of Evidence Ranges* (Figura 25) donde fue necesario especificar las variables que son categóricas, los parámetros para encontrar los puntos de quiebre para las variables continuas y la transición que se va a modelar: no urbano (1) a urbano (2). Los valores utilizados fueron los sugeridos por Soares-Filho, Rodrigues, & Costa (2009), un *mindx* de 1 celda, *maxdx* de 500000 celdas, un ángulo de tolerancia de 5° y el incremento correspondiente al tamaño de la celda (10 m). La variable distancia a botaderos se modeló con un incremento de 50 m y las variables: distancia a áreas verdes, distancia a estadios y distancia a mercados utilizaron un incremento de 20 m, esto debido a que el incremento de 10 m creaba demasiadas categorías innecesarias.



### 3.5.3.3. Modelo para el cálculo de coeficientes de los pesos de evidencia.

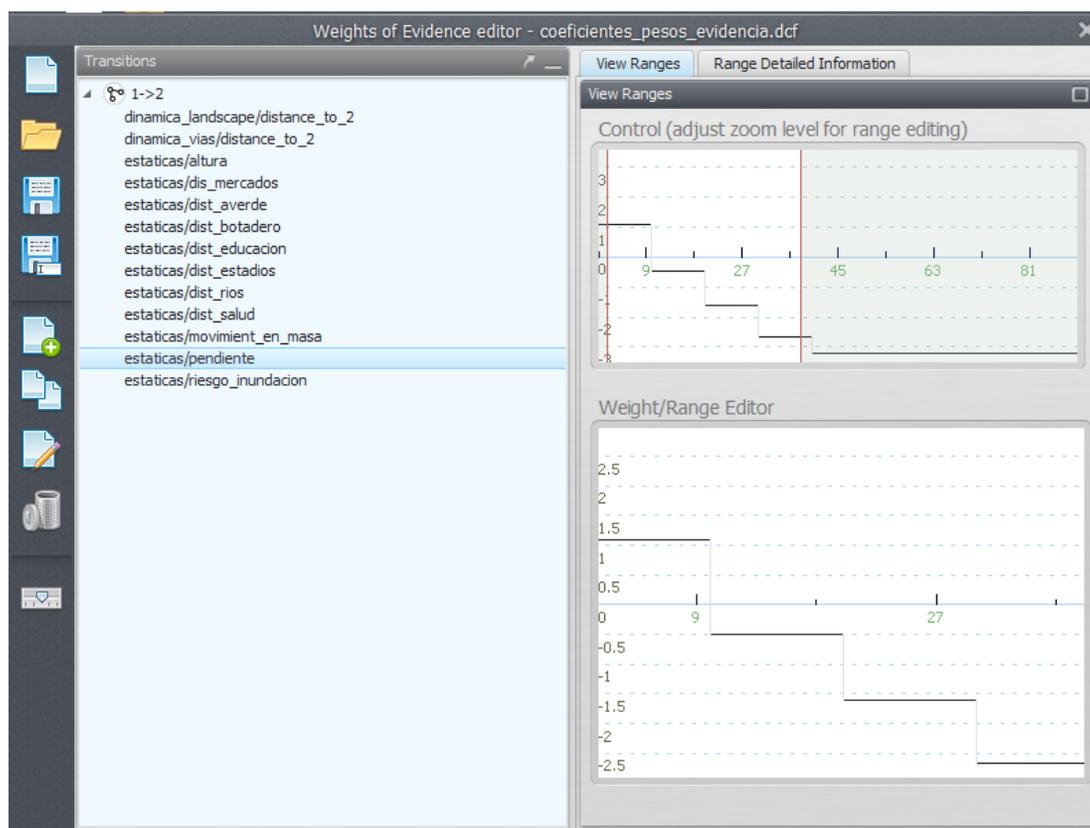
Los insumos del modelo para el cálculo de los coeficientes de pesos de evidencia fueron los rangos obtenidos del modelo anterior, los mapas de uso inicial (1996) y final (2010), los mapas iniciales de las variables dinámicas y el cubo raster de variables explicativas (Figura 26).



**Figura 26.** Modelo de cálculo de coeficientes de pesos de evidencia

La Figura 27 muestra los pesos de evidencia obtenidos en la variable pendiente, donde el primer rango (0-10) tiene un peso de evidencia positivo, lo que muestra que las pendientes entre 0 y 10% favorecen al cambio de uso de suelo de no urbano (1) a urbano (2), pendientes en rangos superiores obtuvieron pesos de evidencia negativa lo que indica que inhiben el cambio de 1 a 2. De esta forma se analizaron todas las variables y en la pestaña *Ranges Detailed Information* se eliminaron los

rangos que se consideraban innecesarios y se modificaron los coeficientes que no representaban la importancia del rango sobre el cambio.

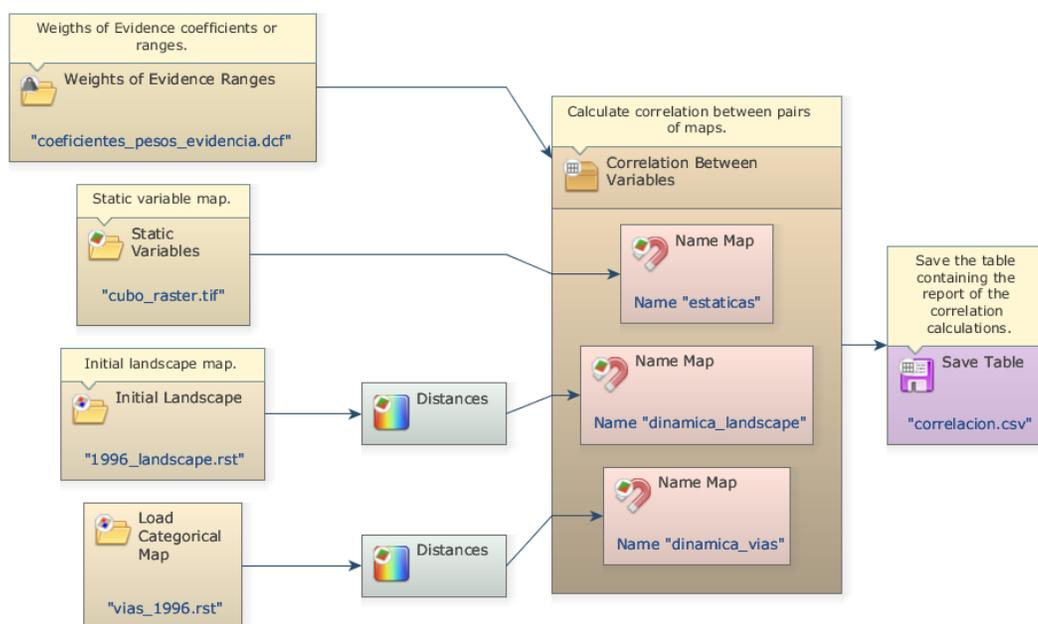


*Figura 27. Weights of Evidence editor para la modificación de rangos y coeficientes.*

#### **3.5.3.4. Modelo para el análisis de la correlación espacial de las variables**

El modelo para el análisis de la correlación espacial de las variables (Figura 28) se construyó con el fin de comprobar la hipótesis de independencia de las variables, necesaria para aplicar el método de pesos de evidencia. Para esto se introdujeron las variables estáticas (cubo raster) y los mapas iniciales de las variables dinámicas. También fue necesario especificar la transición (1 a 2) e incluir los coeficientes de pesos de evidencias para realizar la categorización de las variables continuas antes de analizar su correlación. El resultado es un archivo con los diferentes estadísticos

en los que se comparó las variables en pares. Entre todos los estadísticos se siguió el criterio de Cramer para comprobar la hipótesis de independencia y determinar las variables que se incluirían en el modelamiento.



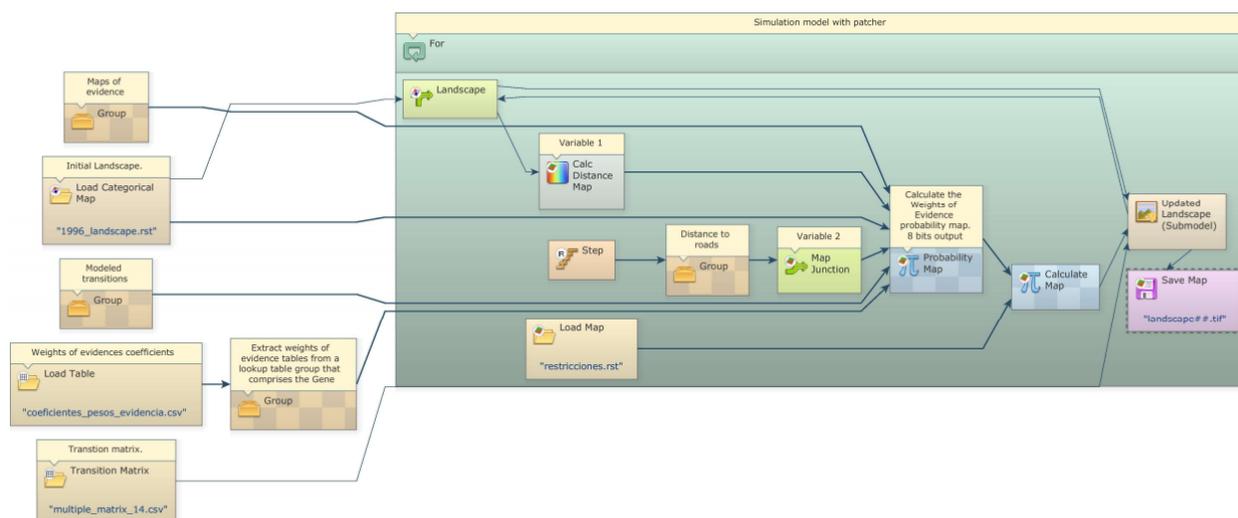
**Figura 28.** Modelo para el análisis de la correlación espacial de las variables

### 3.5.3.5. Modelo para la simulación y validación de crecimiento urbano

Para realizar el modelo de simulación de crecimiento urbano (Figura 29) fueron necesarios los siguientes insumos: matriz de transición múltiple, mapa de uso inicial (1996), el archivo de coeficientes evidencia transformado a *Lookup Table Group* en formato .csv, esta conversión fue de gran ayuda más adelante para la creación del algoritmo genético.

Para la fase de calibración el modelo se ejecutó de manera iterativa 14 veces que representan el tiempo transcurrido en años entre el mapa de uso inicial (1996) y final (2010). En cada iteración se calculó la probabilidad de transición con la ecuación (6) a través de la función *Calculate Map*, a este mapa se le disminuyeron los valores de probabilidad para las áreas de restricción con el fin de

evitar una invasión excesiva que no ocurre en la realidad. Después el mapa recalculado ingresó a la función *Allocate Transition* donde los autómatas celulares *Patcher* y *Expander* fueron los encargados de asignar los cambios (uso no urbano a urbano) a las zonas con mayor probabilidad de transición.

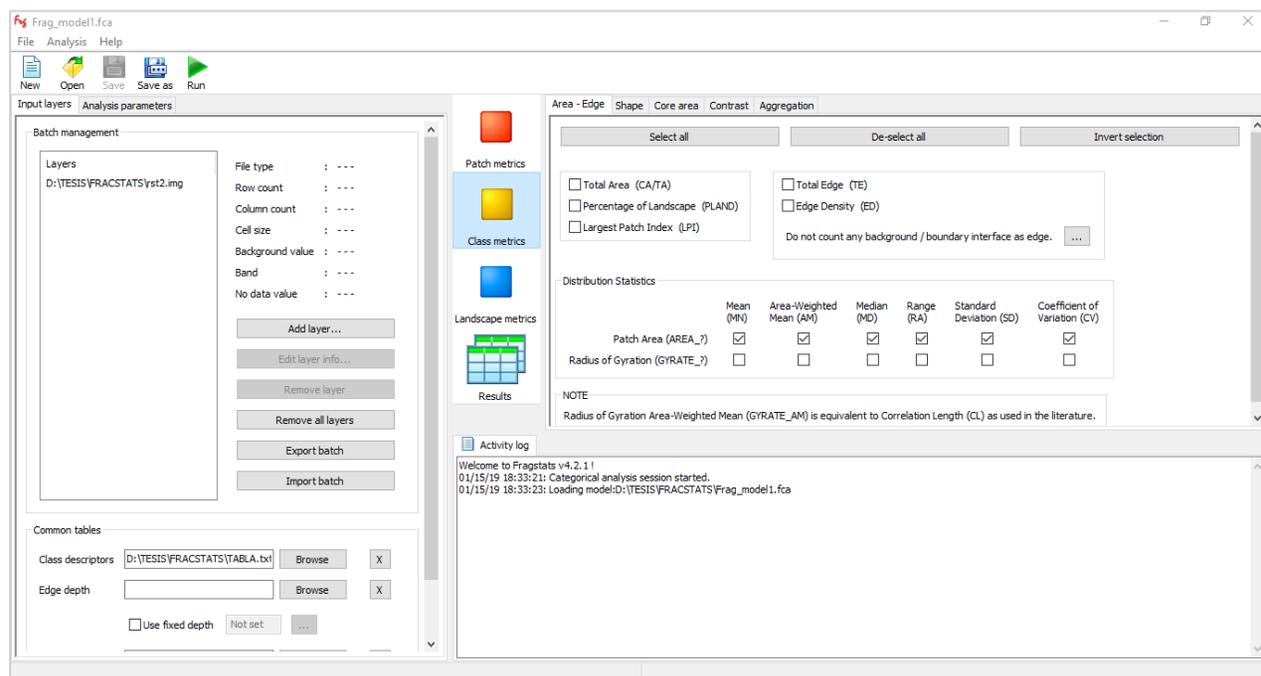


**Figura 29.** Modelo para la simulación del crecimiento urbano

Se definió un porcentaje de 0,8 para cambios realizados por *Expander* y el 0,2 restante para *Patcher*, esta relación se determinó del análisis visual de los mapas de uso de 1996 y 2010. Los parámetros: tamaño medio del parche (1,5 ha), varianza (3 ha) e isometría (1,5) para las franjas de expansión de *Expander* se determinaron a través de la medición del crecimiento de las manchas urbanas con área más significativa. Los parámetros de tamaño medio del parche (1,5 ha), varianza (3 ha) e isometría (2) para la formación de parches en *Patcher* se obtuvieron del cálculo de las medidas de la estructura del paisaje a través del software *Fragstats v4.2.1*.

*Fragstats v4.2.1* (Figura 30) ofreció la opción del cálculo del tamaño de los parches, con esto se obtuvo el tamaño medio y varianza de los parches de la clase urbana sin considerar los parches

más grandes ya que correspondían a las manchas cuyo crecimiento estaba caracterizado por la función *Expander*. Además, se calcularon índices de fragmentación: dimensión fractal, índice de cohesión del parche y distancia al vecino más cercano a nivel de clase para conocer la forma y distribución de los parches en el terreno.



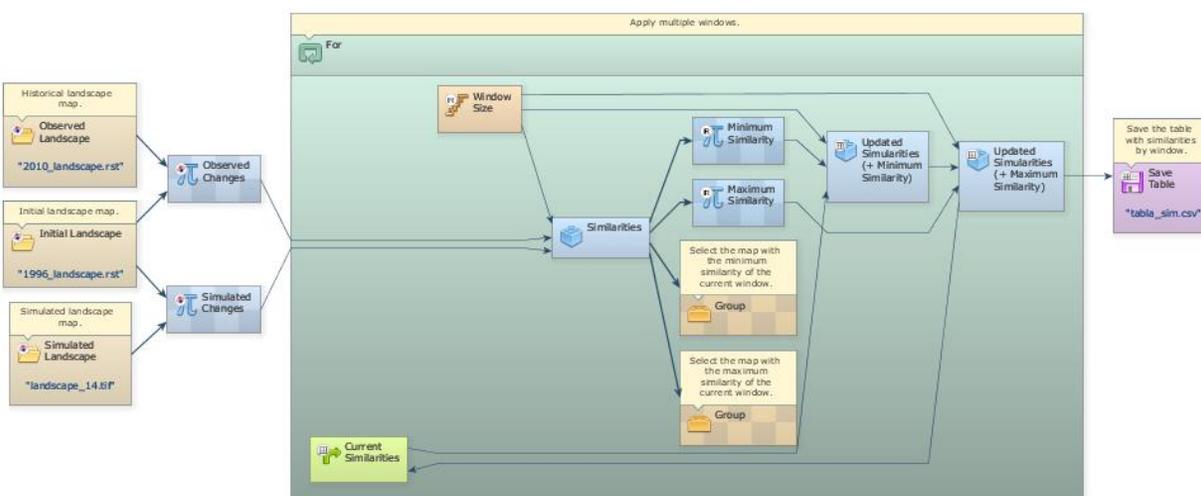
**Figura 30.** Interfaz de Fragstats v4.2.1 para el cálculo de las medidas de la estructura del paisaje por clase y parche.

Cabe mencionar que en el modelo de simulación (Figura 29) se actualizó el mapa de uso con las transiciones realizadas y con esto, el mapa de distancia al uso urbano. Para actualizar el mapa de vías, el modelo asigna el mapa de vías que se va a utilizar (1996, 2010 o 2016) de acuerdo a la cantidad de años transcurridos.

Del modelo de simulación se obtuvo el mapa de uso final simulado (año 2010), para conocer su grado de similitud con el mapa de uso final observado (año 2010), se aplicó un modelo de

validación de diferentes grados de tolerancia (tamaños de ventana) con una función de decaimiento constante (Figura 31). Esto con el fin de determinar el mínimo tamaño de ventana al que el modelo (Figura 29) comienza a tener una similitud significativa ( $>50\%$ ) con la realidad.

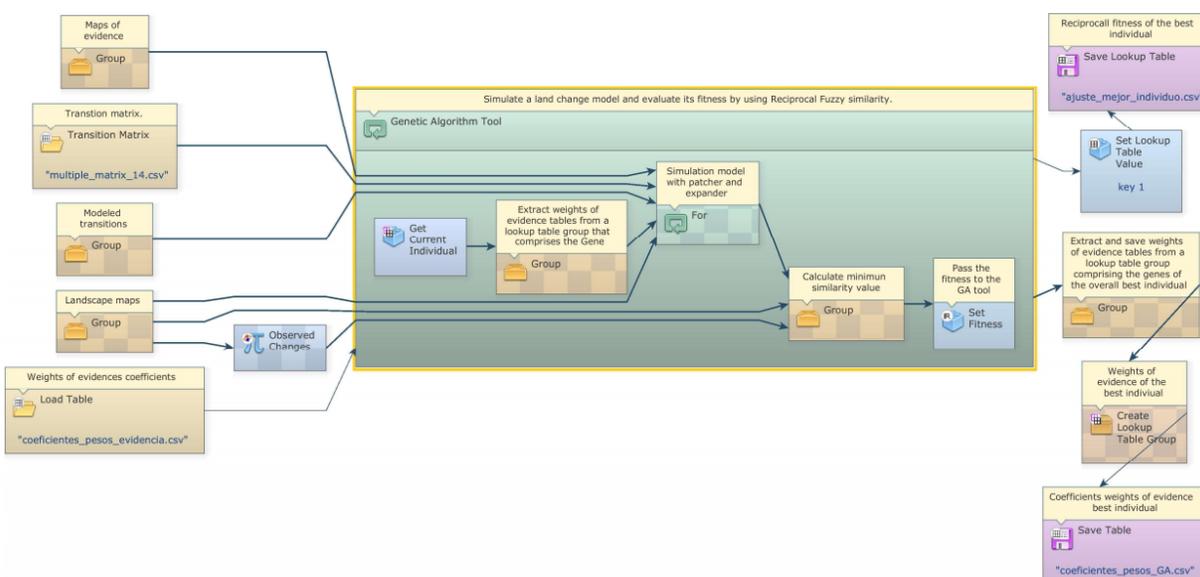
Además fue necesario determinar un tamaño de ventana máxima, Reyna, Reyna, & Vines (2017) definen un tamaño de ventana de 7 celdas que simbolizaban dos manzanas urbanas para su estudio del crecimiento urbano en Portoviejo. En este caso se consideró un tamaño de ventana de 11 celdas que representan una manzana urbana aproximadamente. El modelo (Figura 31) comparó el mapa inicial con el mapa final observado y simulado, de esto se obtuvieron dos mapas de cambios que ingresaron a la función *Calc Reciprocal Similarity Map* donde se calcularon las similitudes del primer mapa de cambio con el segundo y viceversa. La función de decaimiento al ser constante ajustó el peso de cada celda dentro de la ventana a 1. Este modelo arroja dos similitudes, de las que se consideró la mínima similitud para no sobredimensionar el rendimiento del modelo de simulación. La validación se ejecutó de manera iterativa donde el tamaño de la ventana se cambió en cada iteración de 1 a 11 celdas.



**Figura 31.** Modelo para la validación por ventanas múltiples.

### 3.5.3.6. Modelo para la optimización de pesos de evidencia mediante AG

El modelo de simulación de crecimiento urbano inicial fue optimizado mediante un algoritmo genético encargado de la modificación aleatoria de los pesos de evidencia de manera que el modelo aumente su porcentaje de similitud con la realidad. Los pesos de evidencia se ingresaron como un cromosoma a través de un conjunto de tablas *Lookup Table Group*, cada tabla fue un gen y representaba una variable, dentro de la tabla los coeficientes de los pesos de evidencia fueron los alelos. El grupo de tablas ingresó al modelo, donde la función *Get Current Individual* generó la primera generación cuya información genética eran los pesos evidencia modificados. Dentro del modelo (Figura 32) se incluyeron los modelos de la Figura 29 y Figura 31, para que cada individuo simule el crecimiento urbano y su rendimiento sea evaluado mediante el cálculo de la mínima similitud a un tamaño de ventana igual a 1 (10x10m) ya que un menor nivel de tolerancia exigirá al modelo a ajustarse a la realidad. La función *Set Fitness* se encargó de elegir el individuo con mejor rendimiento y pasar su información genética (pesos de evidencia) a la siguiente generación.

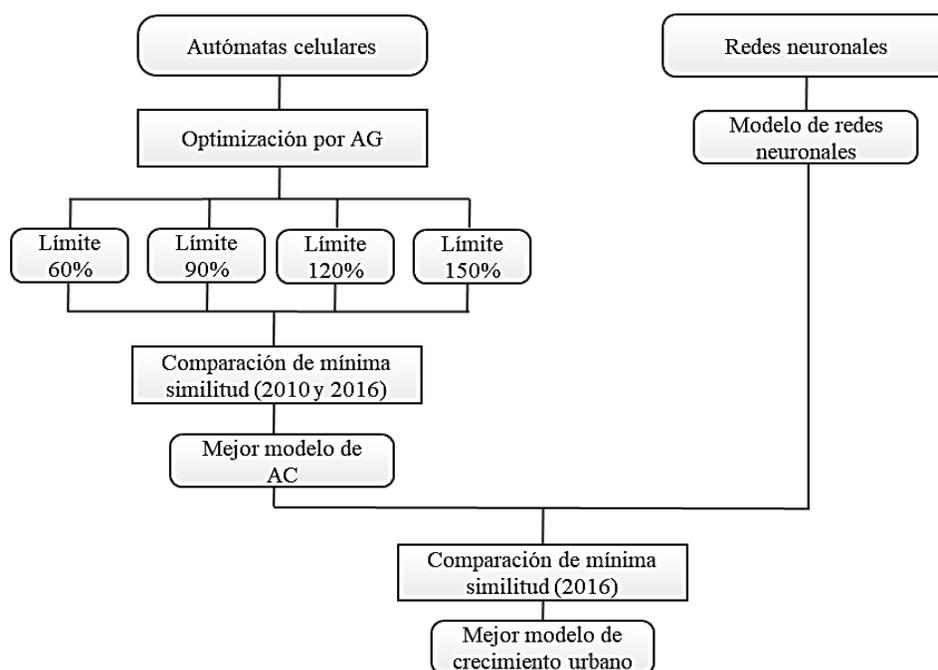


**Figura 32.** Modelo de optimización de pesos de evidencia mediante algoritmos genéticos.

El modelo de optimización (Figura 32) fue ejecutado una vez por individuo para 20 generaciones de 20 individuos cada una. Además, se incluyeron límites inferiores y superiores para la modificación de los pesos de evidencia. Soares-Filho, Rodrigues, & Costa (2009) recomiendan un límite de  $\pm 120\%$  del peso de evidencia para evitar la sobreespecialización, es decir, la obtención de un porcentaje de similitud muy alto en la fase de calibración (1996-2010) y muy bajo en la fase de validación (1996-2016). En este caso se probaron límites de  $\pm 60, 90, 120$  y  $150 \%$ . El modelo arrojó el ajuste del mejor individuo después de varias generaciones y su información genética o los pesos de evidencia que lograron simular de mejor manera el crecimiento urbano. Los pesos optimizados fueron introducidos nuevamente en el modelo de simulación (Figura 29) para obtener el nuevo mapa de uso simulado del año 2010. Para obtener mapas de los años 2016 y 2025 se modificó el número de iteraciones a ejecutarse a 20 y 29 respectivamente.

### **3.6. Validación y comparación de modelos**

Por lo general los métodos de validación de modelos de CCUS se basan en la evaluación de la coincidencia espacial entre el mapa de uso simulado y el mapa de uso observado, algunos de los métodos más utilizados son los análisis ROC, índice Kappa e índices de similitud difusa, este último permite también determinar la coincidencia espacial a distintos niveles de tolerancia, por esta razón fue el escogido para elegir el mejor modelo de crecimiento urbano se siguió el esquema de la Figura 33.



**Figura 33.** Esquema de validación y comparación de modelos.

### 3.6.1. Autómatas celulares con algoritmos genéticos

#### 3.6.1.1. Validación

Para determinar el mejor modelo de autómatas celulares optimizado con algoritmos genéticos se obtuvo la mínima similitud de los mapas simulados con la realidad para las etapas de calibración (2010) y validación (2016) de los modelos de límites de  $\pm 60$ , 90 120 y 150%. El modelo para el cálculo de la similitud difusa (Figura 31) fue creado anteriormente como un paso previo para la optimización por medio de algoritmos genéticos en el modelo de autómatas celulares. Se reutilizó este modelo de ventanas múltiples (1 a 11 celdas) y función de decaimiento constante para obtener el porcentaje de mínima similitud de los modelos.

### 3.6.1.2. Comparación

Una vez calculado el porcentaje de mínima similitud en las etapas de validación y calibración se procedió a comparar los porcentajes mediante una prueba de hipótesis para dos proporciones. Esto debido a que los modelos de límites  $\pm 90$  y  $150$  % presentaron los ajustes más altos pero muy parecidos y es necesario determinar si existe una diferencia significativa entre ambos modelos, y de ser así, qué modelo sería el mejor.

Para realizar esta prueba se consideró la mínima similitud de ambos modelos como una proporción obtenida de poblaciones independientes con tamaños diferentes, además se asume la aproximación normal a la distribución binomial de cada población (Montgomery & Runger, 2002).

Las hipótesis utilizadas fueron:

$$H_0: p_1 = p_2$$

$$H_1: p_1 \neq p_2$$

Donde  $p_1$  y  $p_2$  representan la mínima similitud de los modelos  $\pm 90$  y  $150$  % para la ventana de una celda. El estadístico de prueba se calculó acorde a las ecuaciones (9) y (10), donde  $\hat{P}_1$  y  $\hat{P}_2$  son las proporciones poblacionales obtenidas de los procesos de validación y calibración,  $\hat{P}$  es un parámetro común que se calculó a partir de:

- a) Los tamaños poblacionales o número total de celdas que realizaron la transición en el modelo ( $n_1$  y  $n_2$ ).
- b) El número de observaciones dentro de la clase de interés o número de celdas que cambiaron en la realidad y coincidieron con la transición realizada por el modelo ( $X_1$  y  $X_2$ ).

$$\hat{P} = \frac{X_1 + X_2}{n_1 + n_2} \quad (9)$$

$$Z = \frac{\hat{P}_1 - \hat{P}_2}{\sqrt{\hat{P}(1 - \hat{P}) \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \quad (10)$$

Se consideró un nivel de confianza del 95% y se utilizaron los criterios de  $z_0 > z_{\alpha/2}$  o  $z_0 < -z_{\alpha/2}$  para rechazar la hipótesis nula que supone que la similitud obtenida de los modelos es igual.

### 3.6.2. Comparación LCM y DINAMICA

Los índices de similitud difusa fueron usados también para validar los mapas simulados resultado de los modelos de simulación de LCM (redes neuronales) y DINAMICA (autómatas celulares con AG). Únicamente se validaron los mapas simulados para el año 2016 ya que a diferencia de DINAMICA, LCM no modela el mapa de uso al año 2010.

Se reutilizó el modelo de ventanas múltiples (1 a 11 celdas) y función de decaimiento constante (Figura 31) para obtener el porcentaje de mínima similitud de ambos modelos. No se aplicó una prueba estadística debido a que los porcentajes de mínima similitud fueron ampliamente distintos.

## 3.7. Generación de escenarios prospectivos al año 2025

### 3.7.1. Selección de variables

La prospectiva es una herramienta que permite aproximarse al futuro considerando la complejidad de la realidad mediante la generación de escenarios. La complejidad del crecimiento urbano se deriva no solo de sus dinámicas internas o externas sino también de las decisiones tomadas por los actores que intervienen en este fenómeno.

Un primer modelamiento del crecimiento urbano tendencial de Ibarra se llevó a cabo considerando únicamente variables cartografiadas. Sin embargo, el crecimiento de la ciudad puede estar afectado por otros factores internos o externos que no necesariamente se representan con mapas. Para definir estas nuevas variables explicativas del crecimiento que influyen en la generación de escenarios futuros se consultó a expertos las variables que consideraban importantes en el crecimiento urbano de la ciudad. Los expertos que intervinieron en el estudio fueron dos analistas del departamento de planificación y un analista del departamento de avalúos y catastros del GAD Municipal de Ibarra.

Las variables obtenidas para el estudio se clasificaron por componentes y variable (Tabla 6) acorde a la Guía Metodológica para la elaboración de Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de los Gobiernos Autónomos Descentralizados (SENPLADES, 2015). También se incluyeron en esta clasificación las variables usadas previamente en el modelamiento por autómatas celulares y redes neuronales.

**Tabla 6**  
*Variables por componente*

<b>Componente</b>	<b>Variable del componente</b>	<b>Variable del estudio</b>
<b>Biofísico</b>	Agua	Hidrografía
	Relieve	Altura
		Pendiente
	Amenazas o peligros	Movimientos en masa
Riesgo a inundación		
<b>Socio Cultural</b>	Análisis demográfico	Crecimiento poblacional
		Densidad neta población (hacinamiento)
	Acceso y uso de espacio público	Distancia a estadios
		Distancia a áreas verdes
<b>Económico</b>	Trabajo y empleo	Trabajo
	Principales actividades económicas productivas del territorio	Desarrollo económico
<b>Asentamientos humanos</b>	Infraestructura y acceso a servicios básicos	Cobertura de servicios básicos

**CONTINÚA →**

	Acceso de la población a servicios de educación y salud	Distancia a instituciones educativas Distancia a centros de salud
	Dispersión, concentración poblacional	Altura de edificaciones Crecimiento horizontal
<b>Movilidad, energía y conectividad</b>	Redes viales y de transporte	Distancia a vías
<b>Político institucional y participación ciudadana</b>	Instrumentos de planificación y ordenamiento territorial vigentes o existentes en el GAD	Ordenanza y uso de ocupación de suelo
	Mapeo de actores públicos, privados y sociedad civil	Estabilidad política

### 3.7.2. Método MICMAC

Para definir las variables claves del crecimiento urbano se utilizó el método MICMAC. Cabe recalcar que para la aplicación de este método se excluyeron las variables cuya relación con el crecimiento urbano ya fue modelada previamente mediante con LCM (redes neuronales) y DINAMICA (autómatas celulares). Es decir, el método MICMAC se aplicó únicamente entre 9 variables que no estaban representadas por mapas y se les asignó una codificación para ingresar en el software y una definición clara para evitar confusiones al momento de ponderar las relaciones de influencia y dependencia. Las variables explicativas del crecimiento urbano fueron:

- **Crecimiento poblacional (CP):** Aumento de la cantidad de individuos.
- **Densidad neta poblacional (DP):** Relaciona la densidad poblacional y el hacinamiento.
- **Empleo (E):** Hace referencia a las oportunidades laborales como una de las principales causas por la que las personas se asientan en el territorio urbano propiciando su crecimiento.
- **Desarrollo económico (DE):** Esta variable hace referencia al espacio físico o sectores del área urbana donde se concentra la actividad económica y que pueden contribuir al crecimiento urbano.

- **Cobertura de servicios básicos (CSB):** Los servicios considerados fueron agua potable, luz y alcantarillado, la dotación de los mismos favorece al establecimiento de predios.
- **Altura de edificación (AE):** Permiten la construcción del paisaje vertical de la ciudad para la optimización de servicios y disminución del crecimiento horizontal.
- **Crecimiento horizontal (CH):** Crecimiento físico de la ciudad hacia sus periferias.
- **Cumplimiento de la ordenanza y uso de ocupación de suelo (CO):** El Art. 1 de este documento determina que su finalidad es "el uso racional, ocupacional y utilización del suelo, ejerciendo control sobre el mismo" por lo que su cumplimiento será un factor relevante en el crecimiento de la ciudad.
- **Estabilidad política (EP):** Respecto a las decisiones tomadas por el gobierno central que pueden afectar el crecimiento de la ciudad.

La matriz de influencia directa (Figura 34) se construyó con la pregunta: ¿Qué influencia tiene la variable  $i$  sobre la variable  $j$ ?, siendo  $i$  las variables en las filas y  $j$  las variables sobre las columnas. Con ayuda de los expertos se definieron las relaciones de influencia de las variables, siendo 1 una influencia débil, 2 una influencia moderada y 3 una influencia fuerte. Únicamente se consideraron influencias directas por lo que no se tomaron en cuenta relaciones potenciales (P) de las variables.

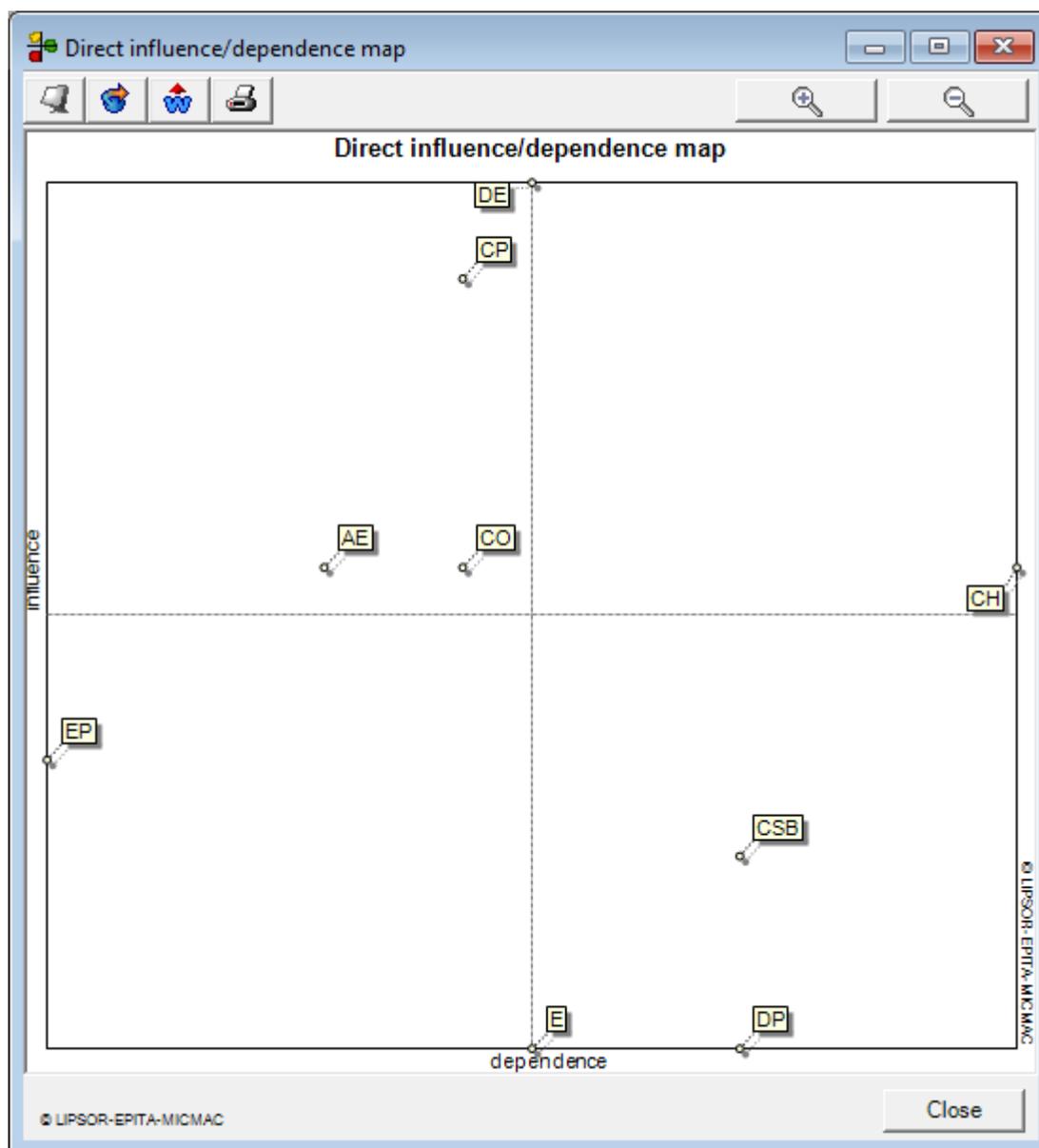
	.	1 : CP	2 : DP	3 : E	4 : DE	5 : CSB	6 : AE	7 : CH	8 : CO	9 : EP
▶ 1 : CP		0	3	3	1	3	0	3	1	1
2 : DP		1	0	1	1	2	1	0	1	0
3 : E		3	0	0	1	0	0	2	0	1
4 : DE		3	3	3	0	1	2	3	0	1
5 : CSB		1	1	0	1	0	1	2	3	0
6 : AE		0	3	0	1	2	0	3	3	0
7 : CH		1	3	1	1	3	1	0	1	1
8 : CO		0	1	0	2	3	3	3	0	0
9 : EP		1	0	3	3	0	0	2	1	0

Influences range from 0 to 3, with the possibility to identify potential influences:  
 0: No influence  
 1: Weak  
 2: Moderate influence  
 3: Strong influence  
 P: Potential influences

© LIPSOR-EPITA-MICMAC

**Figura 34.** Matriz de influencia directa

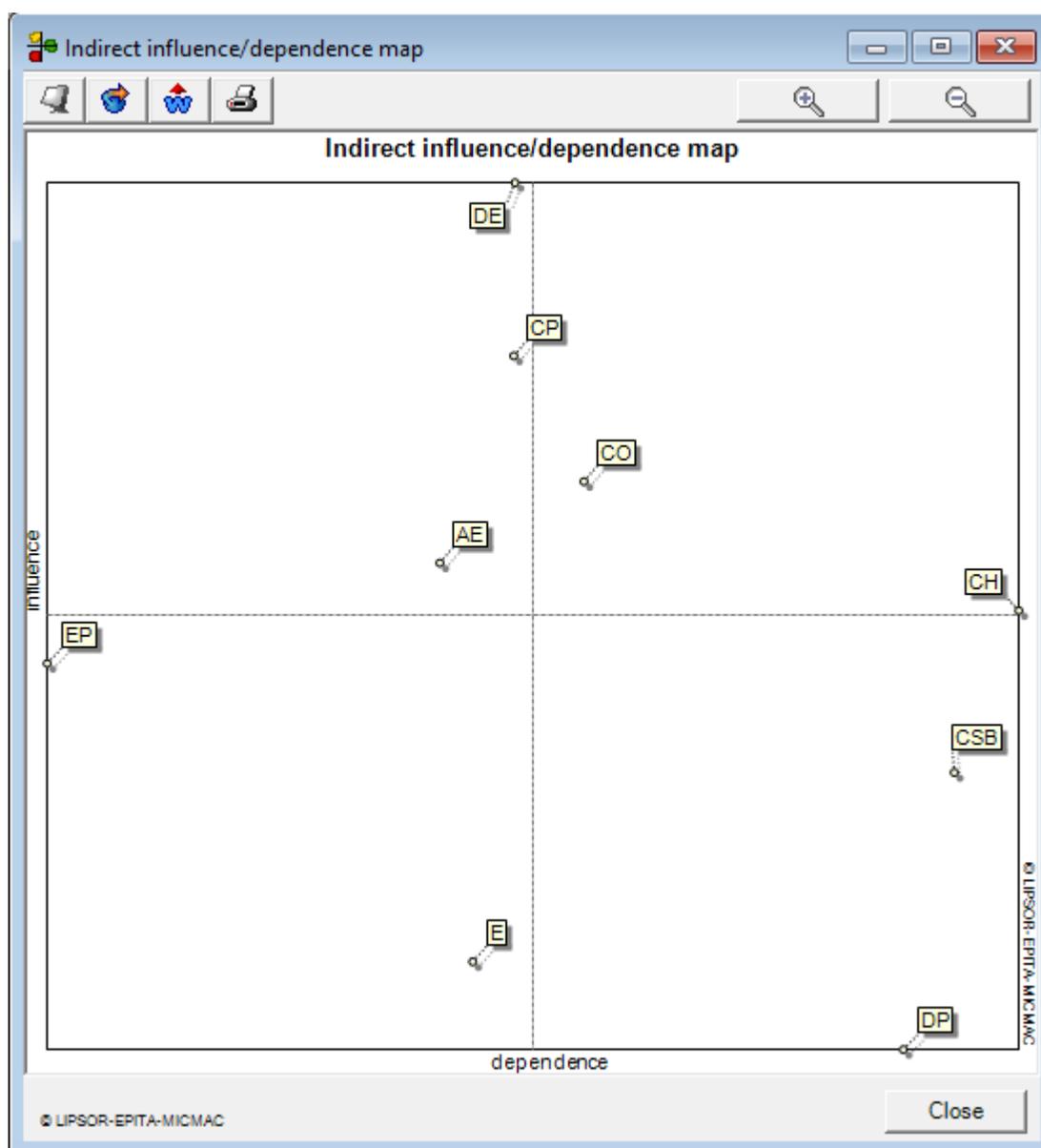
Se realizó la suma de filas y columnas de la matriz para conocer la influencia (fila) y dependencia (columna) de cada variable. Estos valores fueron colocados en el plano cartesiano (Figura 35) donde el eje (y) representa la influencia y el eje (x) a la dependencia. Acorde a Cely (1999) las variables claves son aquellas que se encuentran en el cuadrante de la zona de conflicto (alta influencia y dependencia) y zona de poder (alta influencia y baja dependencia), el límite entre estas zonas se determinó como  $100/n$  siendo  $n$  el número de variables, es decir, 9. En este caso las variables claves seleccionadas fueron: crecimiento horizontal, desarrollo económico, crecimiento poblacional, cumplimiento de la ordenanza y altura de edificación.



**Figura 35.** Gráfica dependencia vs influencia para la influencia directa de las variables

Por último, se determinaron las variables claves que poseían una relación indirecta con el crecimiento urbano, para esto se ajustó a 5 el número de iteraciones o número de veces que la matriz de influencia directa debía multiplicarse para sí misma. El valor de influencia y dependencia se colocaron en el plano cartesiano (Figura 36). Las variables en los cuadrantes de poder y de

conflicto coincidieron con las variables claves obtenidas de la influencia directa, por lo que las 5 variables claves antes mencionadas se mantuvieron y fueron las utilizadas en análisis posteriores.

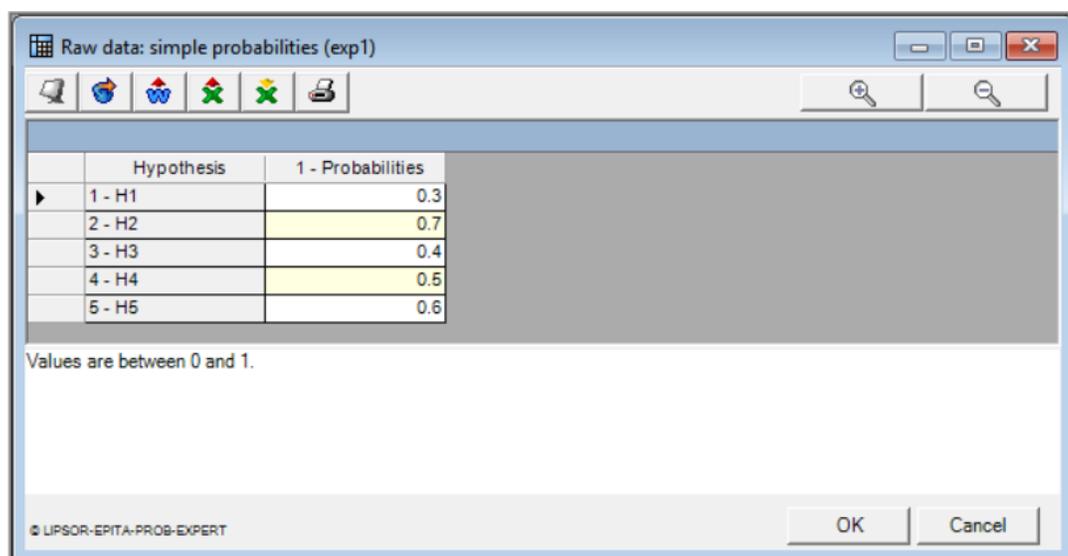


**Figura 36.** Gráfica dependencia versus influencia para la influencia indirecta de las variables

### 3.7.3. Método de impactos cruzados SMIC

El método de impactos cruzados permite evaluar la probabilidad de ocurrencia de un escenario representado por un conjunto de hipótesis relacionadas a las variables claves obtenidas anteriormente.

Las hipótesis para el escenario tendencial al año 2025 se realizaron analizando datos del comportamiento de las variables claves en el pasado (crecimiento poblacional, altura de edificación) y de los resultados reflejados por el modelo de simulación (crecimiento horizontal, desarrollo económico en área y cumplimiento de la ordenanza). Las hipótesis de los escenarios positivos y negativos al año 2025 fueron elaboradas por los expertos tomando como referencia las hipótesis tendenciales. Los expertos también se encargaron de calificar la probabilidad simple y condicional de ocurrencia de cada una de las hipótesis. Toda la información de los expertos respecto a las hipótesis fue recopilada a través de una encuesta (ver Anexo A) donde se incluyó cierta información histórica de la ciudad para generar escenarios más coherentes.



	Hypothesis	1 - Probabilities
▶	1 - H1	0.3
	2 - H2	0.7
	3 - H3	0.4
	4 - H4	0.5
	5 - H5	0.6

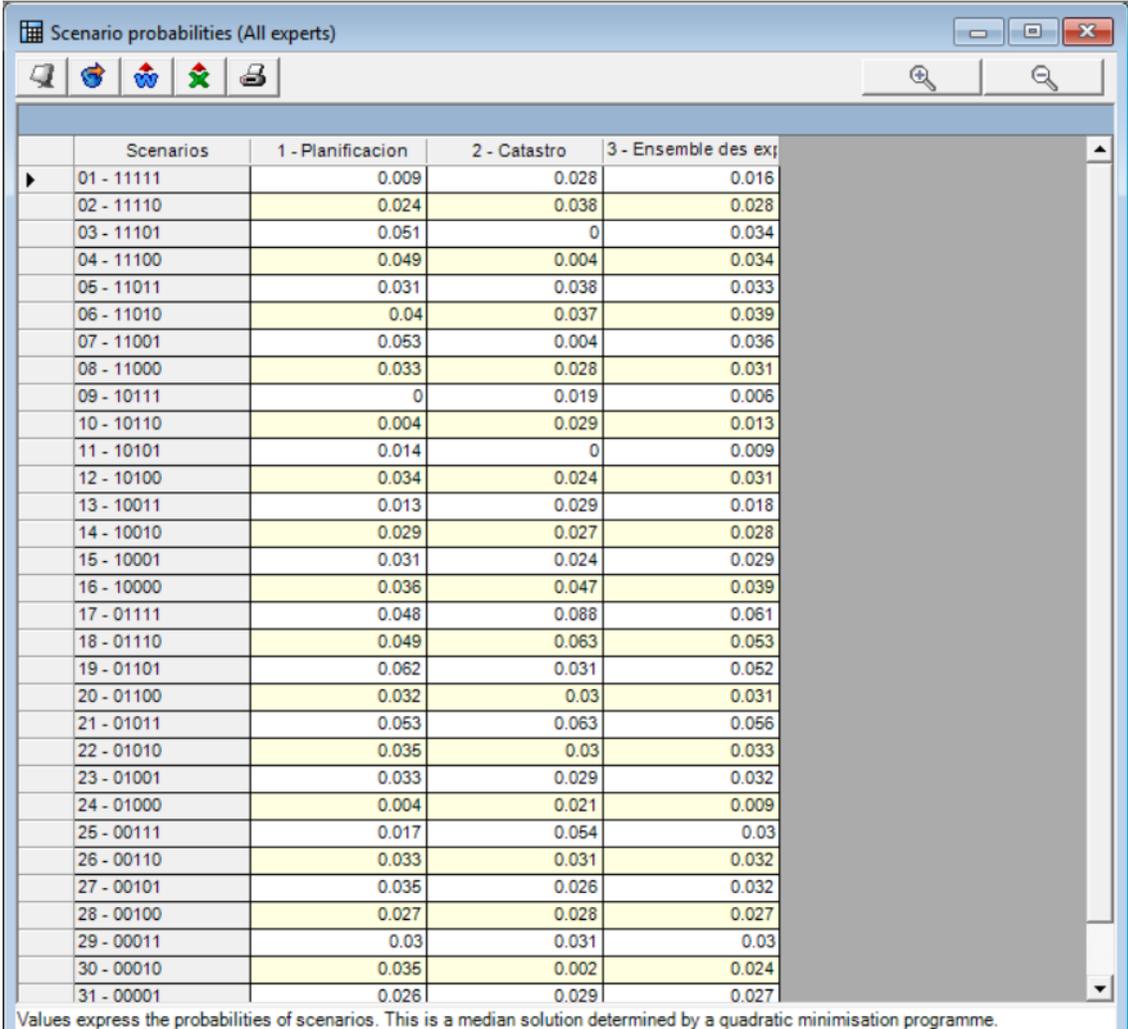
Values are between 0 and 1.

© LIPSOR-EPITA-PROB-EXPERT

OK Cancel

**Figura 37.** Ingreso de probabilidades simples

Las hipótesis obtenidas para cada escenario se introdujeron en el software Smic-Prob-Expert, además el coeficiente de las relaciones de poder entre los actores fue ajustado a 1 ya que se consideró que los departamentos de planificación y catastro trabajan a la par por el desarrollo el cantón. Después se introdujeron las probabilidades de ocurrencia simple y condicionales determinadas por los expertos (Figura 37) y se obtuvo la probabilidad combinada de ocurrencia de las hipótesis y consecuentemente de escenarios (Figura 38).



Scenarios	1 - Planificación	2 - Catastro	3 - Ensemble des ex
01 - 11111	0.009	0.028	0.016
02 - 11110	0.024	0.038	0.028
03 - 11101	0.051	0	0.034
04 - 11100	0.049	0.004	0.034
05 - 11011	0.031	0.038	0.033
06 - 11010	0.04	0.037	0.039
07 - 11001	0.053	0.004	0.036
08 - 11000	0.033	0.028	0.031
09 - 10111	0	0.019	0.006
10 - 10110	0.004	0.029	0.013
11 - 10101	0.014	0	0.009
12 - 10100	0.034	0.024	0.031
13 - 10011	0.013	0.029	0.018
14 - 10010	0.029	0.027	0.028
15 - 10001	0.031	0.024	0.029
16 - 10000	0.036	0.047	0.039
17 - 01111	0.048	0.088	0.061
18 - 01110	0.049	0.063	0.053
19 - 01101	0.062	0.031	0.052
20 - 01100	0.032	0.03	0.031
21 - 01011	0.053	0.063	0.056
22 - 01010	0.035	0.03	0.033
23 - 01001	0.033	0.029	0.032
24 - 01000	0.004	0.021	0.009
25 - 00111	0.017	0.054	0.03
26 - 00110	0.033	0.031	0.032
27 - 00101	0.035	0.026	0.032
28 - 00100	0.027	0.028	0.027
29 - 00011	0.03	0.031	0.03
30 - 00010	0.035	0.002	0.024
31 - 00001	0.026	0.029	0.027

Values express the probabilities of scenarios. This is a median solution determined by a quadratic minimisation programme.

**Figura 38.** Probabilidad de ocurrencia obtenida para escenarios positivos

#### **3.7.4. Mapas de escenarios prospectivos al año 2015**

Para la generación de los mapas de escenarios prospectivos, se consideraron las hipótesis planteadas para los escenarios tendencial, positivo y negativo con mayor probabilidad de ocurrencia. El mapa del escenario tendencial fue obtenido de la simulación del crecimiento mediante el modelo mejor ajustado. Para los escenarios positivos y negativos, ciertas variables tradujeron sus hipótesis a condiciones que se podían incluir en el modelo. Para la variable desarrollo económico se modificó la probabilidad de transición para que se produzca o no la ocupación del área destinada a las actividades comerciales. Para la variable de crecimiento urbano se modificó la tasa de transición anual y el porcentaje correspondiente a *Patcher* y *Expander* de manera que se produzca un crecimiento y dispersión distinto a la tendencia. Para la variable cumplimiento de la ordenanza se realizó una modificación de la probabilidad de transición para impedir o permitir la ocupación de las zonas de restricción. Se ejecutó el modelo de simulación de la Figura 29 modificadas las consideraciones antes mencionadas y tomando como mapa inicial el del año 2016. Se obtuvieron los escenarios de crecimiento urbano positivo y negativo.

#### **3.8. Plan de uso y ocupación del suelo al año 2025**

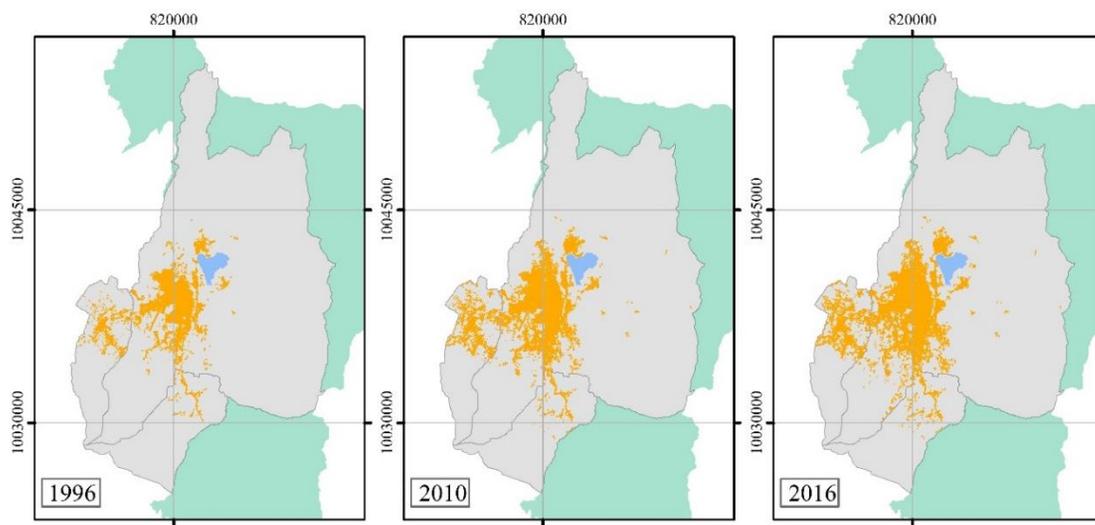
Acorde al escenario tendencial de crecimiento urbano al año 2025 se realiza el plan de uso y ocupación del suelo tomando como base la zonificación propuesta por el GAD Municipal Ibarra (2015) en la “Ordenanza que regula el uso y ocupación del suelo en el cantón Ibarra”. Además, se consideraron las zonas de expansión de la mancha urbana a futuro para generar usos y establecer parámetros de edificación más apropiados a la realidad del suelo urbanizado y que permitan una correcta distribución de los equipamientos y evitar el crecimiento hacia zonas de riesgo.

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS

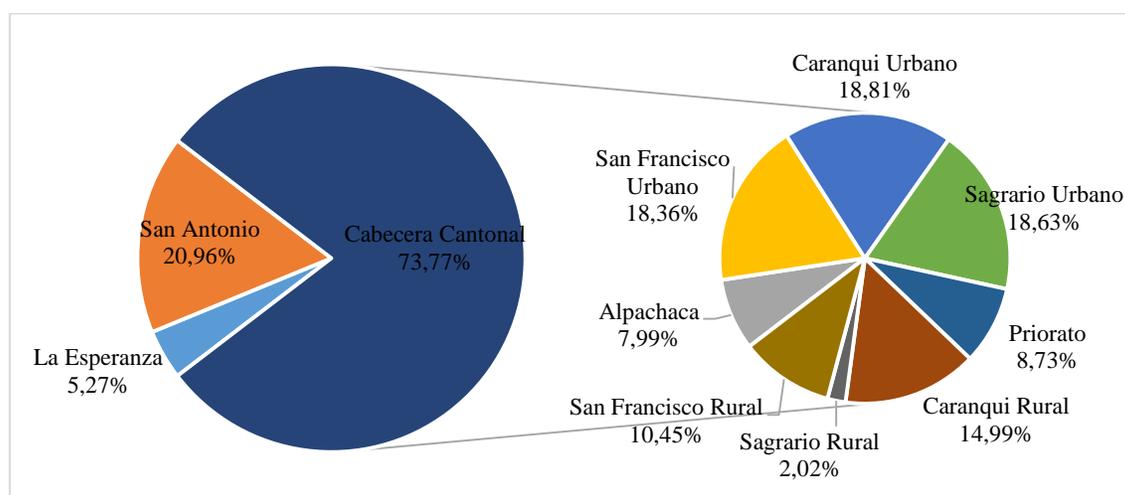
#### 4.1. Análisis multitemporal

La Figura 39 muestra los mapas de uso urbano para la zona de estudio, obtenidos de la interpretación de las ortofotos e imágenes satelitales. Como se puede observar existe una evidente expansión de la mancha urbana con un crecimiento de 1709,823 ha entre los años de 1996 y 2016. El 73,77% del crecimiento se produjo en la cabecera cantonal, un 20,96% en la parroquia rural de San Antonio y el 5,27 % restante se produjo en La Esperanza. El crecimiento importante que se produce en San Antonio y la cabecera cantonal de Ibarra (ciudad de Ibarra) puede estar relacionado a factores como la dotación de servicios que acorde al INEC (2010) es superior al 90% en estos sectores. Por otra parte, el crecimiento significativo de la ciudad de Ibarra y San Antonio ha ocasionado un proceso de unión entre sus núcleos urbanos y con ello la urbanización del área que los conecta.



**Figura 39.** Mapas de uso urbano de Ibarra para los años 1996, 2010,2016

En la Figura 40 se puede observar la distribución del área de crecimiento en la zona de estudio en el periodo 1996-2016. Dentro de la cabecera cantonal las zonas urbanas de las parroquias San Francisco, Sagrario y Caranqui son las que presentaron el mayor aporte al crecimiento y esto puede estar relacionado a la actividad comercial, funciones y servicios que se concentran en estas parroquias acorde a Herrera (2011). Por otra parte, la zona rural de Caranqui presenta un crecimiento importante caracterizado por la construcción de conjuntos habitacionales dispersos que ocasionan la fragmentación del suelo.



**Figura 40.** Distribución del área de crecimiento por parroquias

En la Tabla 7 se presentan las coberturas afectadas por el crecimiento urbano en entre 2010 y 2016. En este periodo 505,245 ha de diferentes coberturas cambiaron a urbanas. La principal cobertura afectada que cambio a urbana fue el área de cultivos lo que repercute en la disminución de zonas destinadas a la provisión de alimentos para la zona urbana. Otras áreas afectadas fueron los pastos y vegetación arbustiva.

**Tabla 7***Áreas de coberturas que cambiaron a urbana.*

<b>Cobertura</b>	<b>Área (ha)</b>
Área de cultivo	335.426
Área erosionada	2.344
Arboricultura	5.836
Bosque	0.307
Pastos	89.151
Vegetación arbustiva	65.331
Páramo	6.850
Total	505.245

## 4.2. Calibración de modelos multivariantes

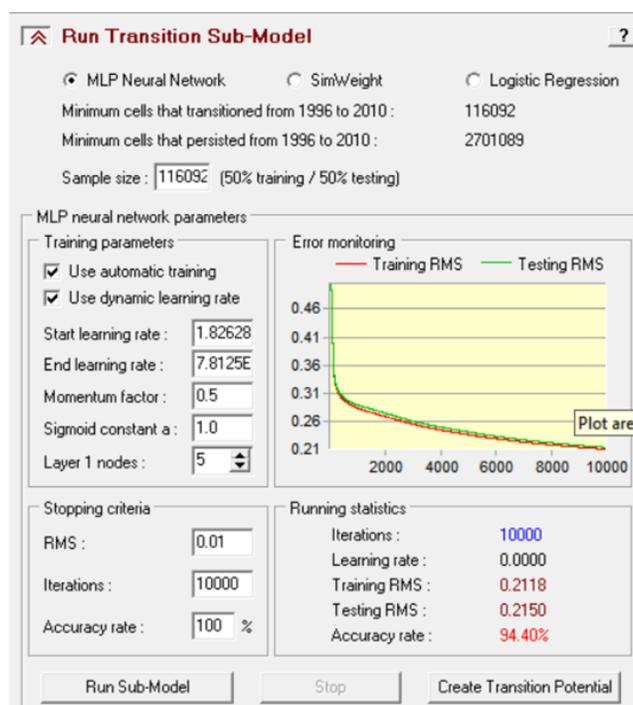
### 4.2.1. LCM basado en Redes Neuronales

En la Tabla 8, se presenta una matriz con los valores obtenidos de la prueba V de Cramer, que reflejan el poder de asociación entre las 13 variables explicativas (filas) y el uso urbano (1) (columna). De acuerdo a Eastman (2012) una V de Cramer de 0,15 o más indica que las variables son útiles mientras que valores de 0,4 o más indica que son buenas, para el caso de p, un valor bajo no es buen indicador, pero uno alto es una señal de que la variable pueda ser rechazada

**Tabla 8***Coefficientes de la prueba V de Cramer aplicada a la variable explicativa*

<b>Variables</b>	<b>Uso urbano</b>	
	<b>V de Cramer</b>	<b>p</b>
Distancia a uso urbano	0.7921	0
Distancia a áreas verdes	0.6335	0
Distancia a mercados	0.6118	0
Distancia a centros educativos	0.6106	0
Distancia a centros de salud	0.6066	0
Distancia a estadios	0.5498	0
Altura	0.5480	0
Pendiente	0.4786	0
Movimientos en masa	0.4734	0
Distancia a vías	0.4303	0
Distancia a ríos	0.4155	0
Distancia a botadero	0.2747	0
Riesgo a inundación	0.2139	0

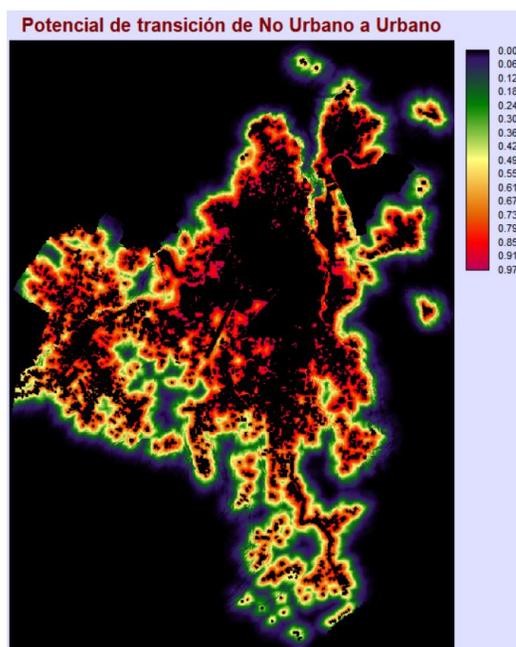
Las variables: distancia a botadero y riesgo a inundación presentan una V de Cramer mayor a 0,15, por lo tanto, son consideradas útiles, y las 11 variables restantes un valor mayor a 0,4, lo que indica que son buenas, debido a que los valores resultantes para V de Cramer en ningún caso fueron menores a 0,15, se verifica que de las 13 variables explicativas utilizadas en los modelos ninguna debería descartarse, ya que tienen un buen potencial explicativo de asociación con el uso urbano. A continuación, en la Figura 41, se muestran los parámetros finales de la red neuronal MLP al terminar su entrenamiento, que se dio cuando, en sus estadísticas de corrida (running statistics) las iteraciones llegan al valor definido de iteraciones (10000) en los criterios de pausa (stopping criteria) y, su RMS y precisión de velocidad (accuracy rate) se asemejan.



**Figura 41.** Parámetros de entrenamiento MLP

Como resultado final se obtuvo un mapa de potencial de transición (Figura 42), donde cada pixel (célula) adquiere un valor entre 0 a 1, que se traduce como la aptitud que este posee para mutar

hacia el uso urbano o permanecer estable en cada iteración, de acuerdo a la leyenda ubicada en el margen derecho de la imagen, tonalidades amarillo, naranja y rojo (cercanas a 1) significan un mayor potencial de los píxeles para convertirse en uso urbano, y tonalidades azul, verde y negro (cercanas a 0) mayor potencial de permanecer estable al uso al que pertenece el pixel.



**Figura 42.** Mapa potencial de transición

Como resultado del cálculo de probabilidad de transición por medio de la Cadena de Markov, se presenta una matriz de doble entrada (Tabla 9), en la cual dado un uso (urbano, no urbano) en las filas, se muestra la probabilidad respectiva de que se convierta en cada una de las categorías dadas en las columnas para la fecha de predicción (2016).

**Tabla 9**

*Matriz de probabilidad de transición*

	No urbano	Urbano
No urbano	0,9833	0,0167
Urbano	0,0000	1,0000

Al interpretar los resultados de la Tabla 9, se tiene que, para el caso del uso no urbano, este presenta una probabilidad de 0,0167 para transformarse en urbano y 0,9833 de que se mantenga, y en cuanto al uso urbano una probabilidad 0 de convertirse en no urbano, y 1 de que se mantenga como tal, es decir que no cambie con el tiempo. Cabe recalcar que existe una ligera probabilidad de que el uso no urbano cambie a urbano, lo cual refleja un posible crecimiento urbano para el futuro.

#### 4.2.1. Autómatas Celulares

Las Tablas 10 y 11 muestran las matrices de transición obtenidas del modelo de cálculo de matrices de transición para el periodo 1996-2010 estas indicaron que el 4,12% del uso no urbano cambió a urbano en la Ibarra y el cambio producido cada año fue de 0,29 %.

**Tabla 10**

*Matriz de transición simple*

De/A	No urbano	Urbano
No urbano	---	0,0412
Urbano	0	---

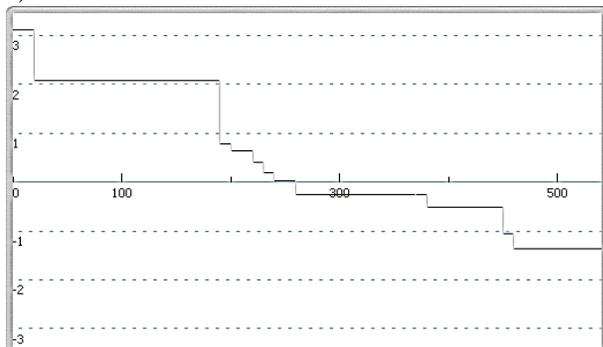
**Tabla 11**

*Matriz de transición múltiple*

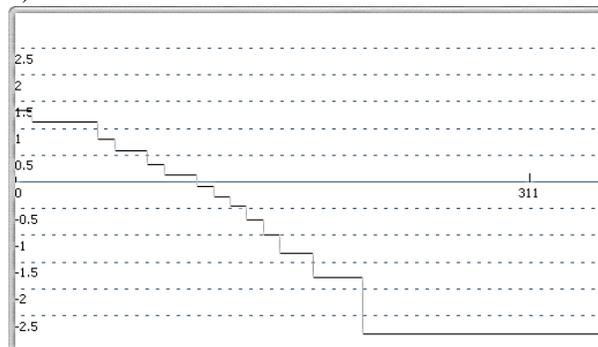
De/A	No urbano	Urbano
No urbano	---	0,0029
Urbano	0	---

En la Figura 43 se observan los rangos y coeficientes de pesos de evidencia obtenidos de sus modelos, el eje (x) representa la variable de estudio y el eje (y) el peso para cada rango, de esta manera se pudo conocer la relación que guarda la variable con el crecimiento urbano.

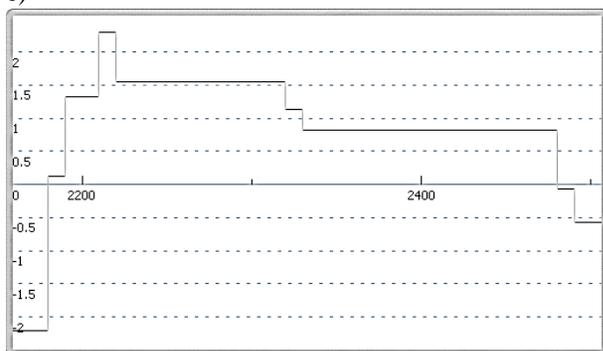
a)



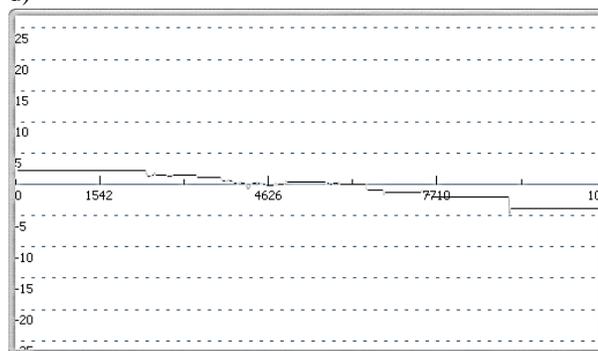
b)



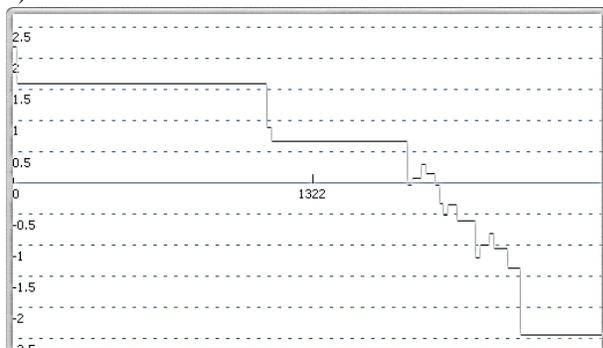
c)



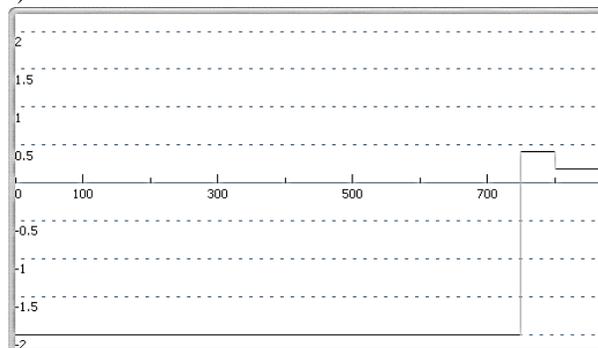
d)



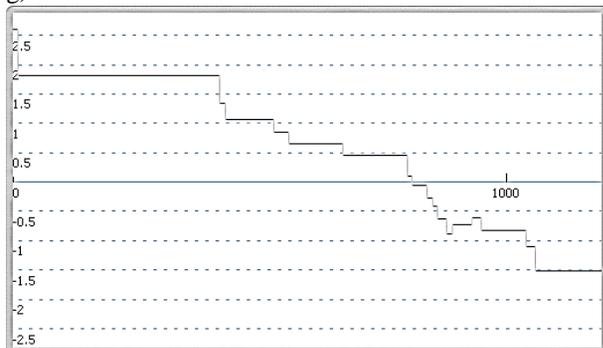
e)



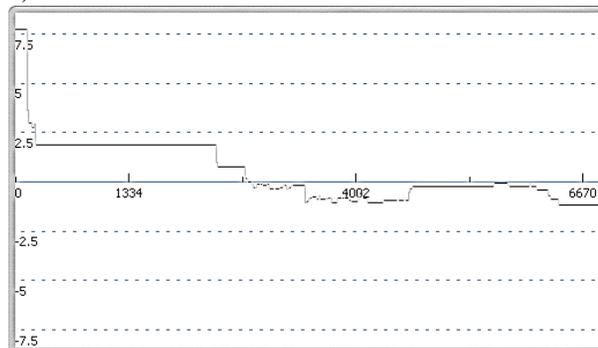
f)

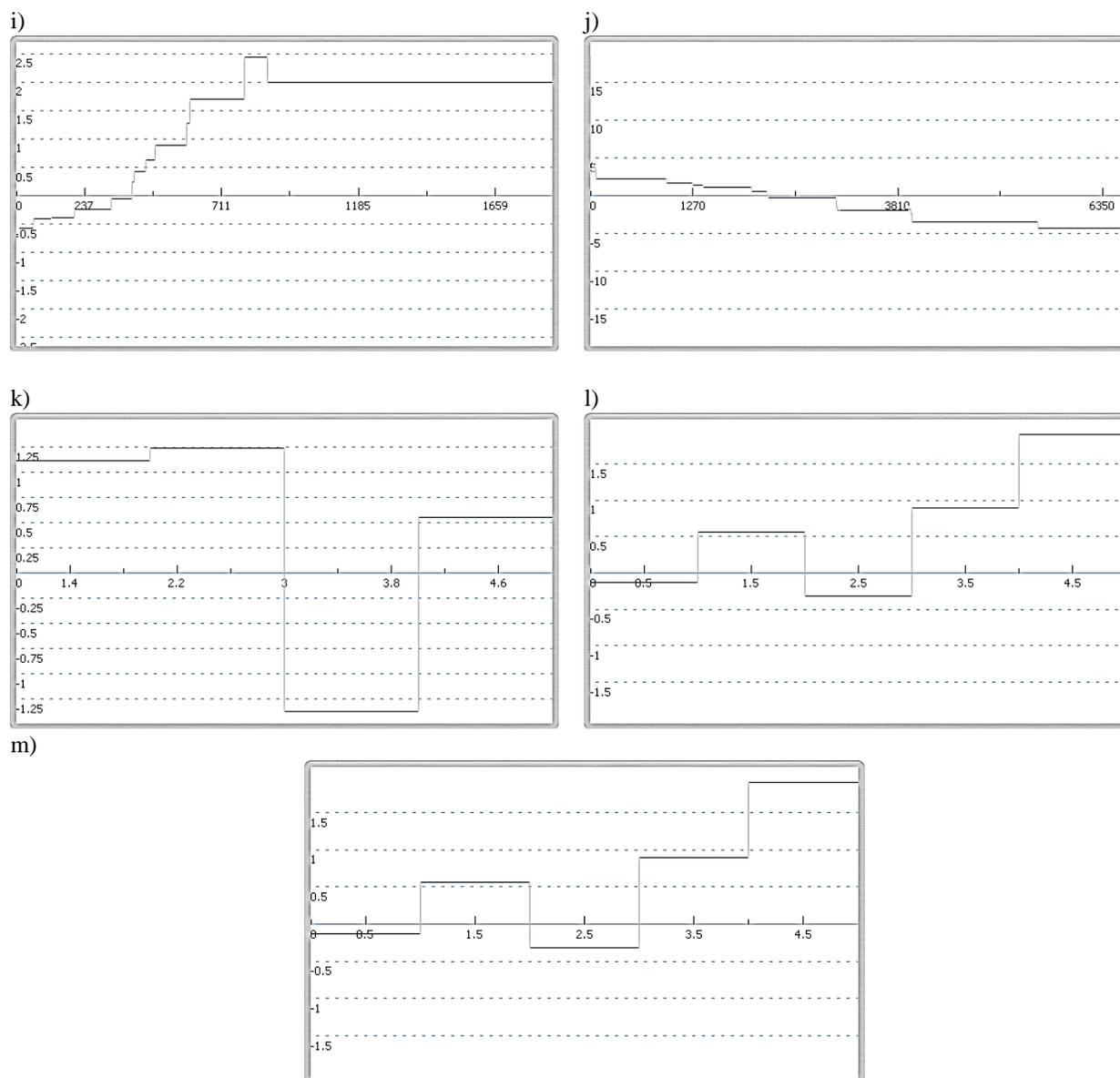


g)



h)





**Figura 43.** Gráficas de variable vs peso de evidencia: a) distancia al uso urbana, b) distancia a vías, c) altura, d) distancia a mercados, e) distancia a áreas verdes, f) distancia al botadero, g) distancia a centros educativos, h) distancia a ríos, i) distancia a centros de salud, j) distancia a estadios k) movimientos en masa, l) pendiente, m) riesgo a inundación.

Para el caso de la distancia a lo urbano, las distancias menores a 240 metros presentaron un peso positivo, siendo el más alto 3,1059 para la distancia entre 1 y 20 m, es decir, la cercanía al uso urbano favorece la urbanización a una distancia menor a 240 m en Ibarra, distancias superiores

inhiben el cambio de uso. Para la variable distancia a vías, valores menores a 110 m obtuvieron pesos positivos que favorecen al establecimiento del uso urbano, el peso más alto fue de 1,3265 para la distancia de 0 a 10 m de la vía. Para las alturas, se encontró un rango favorable para el crecimiento urbano entre 2180 y 2480, siendo el más óptimo el rango de 2210 a 2220 m con un peso de 2,2935. La distancia a mercados obtuvo pesos positivos que favorecen el cambio hasta las distancias menores a 5940 m, el peso más alto fue de 2,1647 para distancias menores a 2400 m, esto puede deberse a que los mercados más importantes están centralizados en el núcleo urbano de la cabecera cantonal. Las distancias a áreas verdes presentaron pesos favorables a la urbanización hasta distancias de 1860 m, siendo el peso más alto 2,1847 para el rango de 0 a 20 m, esto indica una predilección por parte de la población para asentarse cerca de áreas para su recreación. La variable distancia al botadero indica que el crecimiento urbano se inhibe hasta una distancia de 750 m del botadero. La variable distancia centros educativos indica pesos de evidencia positivos hasta una distancia de 810 m, el peso más alto fue 2,5958 para el rango de 0 a 20 m, lo que indica la predilección de la población por asentarse cerca de lugares de formación. Para la variable distancia estadios se establecieron pesos positivos hasta las 2700 m, el peso más alto fue de 7,7203 para la distancia entre 0 y 160 m lo que indica que la cercanía a estadios benefician el cambio del uso no urbano a urbano. La distancia a ríos indica que pesos positivos a partir de los 400 m de distancia a los ríos, lo que indica la población prefiere no asentarse en zonas muy cercanas a los ríos menores a los 400 m de distancia. Con respecto a la variable distancia a centros de salud, se observó que el crecimiento urbano se ve favorecido por pesos positivos hasta los 2190 m, al igual que los mercados los principales centros de salud están centralizados en la cabecera cantonal, el peso más alto obtenido fue de 18,2832 para el rango de 0 a 10 m lo que indica una fuerte relación entre la instalación de centros de salud y el establecimiento de la población. La variable movimientos en

masa evidenció un peso negativo únicamente en la categoría 3 de alta susceptibilidad a movimientos en masa. Para la variable pendiente se observan un peso positivo de 1,0904 que favorece el crecimiento entre 0 a 10 % de pendiente. La variable riesgo a inundación presenta pesos positivos para las categorías baja, media y alta y pesos negativos que repelen la urbanización para las categorías nula (1) y crítica (2), sin embargo esto no necesariamente reflejó la relación que guarda la variable con la transición no urbana a urbana, ya que la mayor parte de la zona urbana se encuentra en zona de riesgo nulo, el peso de evidencia para esta categoría se vio afectado por las zonas no urbanizadas de mayor área que se encontraban dentro de la categoría nula.

Como resultado del cálculo de la correlación espacial se obtuvo el estadístico de Cramer para 78 relaciones entre las 13 variables utilizadas para explicar el crecimiento urbano de Ibarra. La Tabla 12 indica los valores más altos obtenidos:

**Tabla 12**

*Estadístico de Cramer entre variables explicativas*

<b>Primera variable</b>	<b>Segunda Variable</b>	<b>Cramer</b>
Distancia al uso urbano	Movimientos en masa	0,3823
Altura	Movimientos en masa	0,3738
Distancia a mercados	Movimientos en masa	0,3710
Distancia a estadios	Distancia a centros de salud	0,3586
Distancia a áreas verdes	Movimientos en masa	0,3576

El mayor estadístico de Cramer fue de 0,3823 para las variables movimientos en masa y distancia a lo urbano, dado que este valor es menor a 0,5, se asume que no existe una correlación de las variables acorde a Espinoza (2016). El resto de variables presentaron una correlación aún más baja comprobando así la independencia de las variables y conservándolas a todas dentro del modelo.

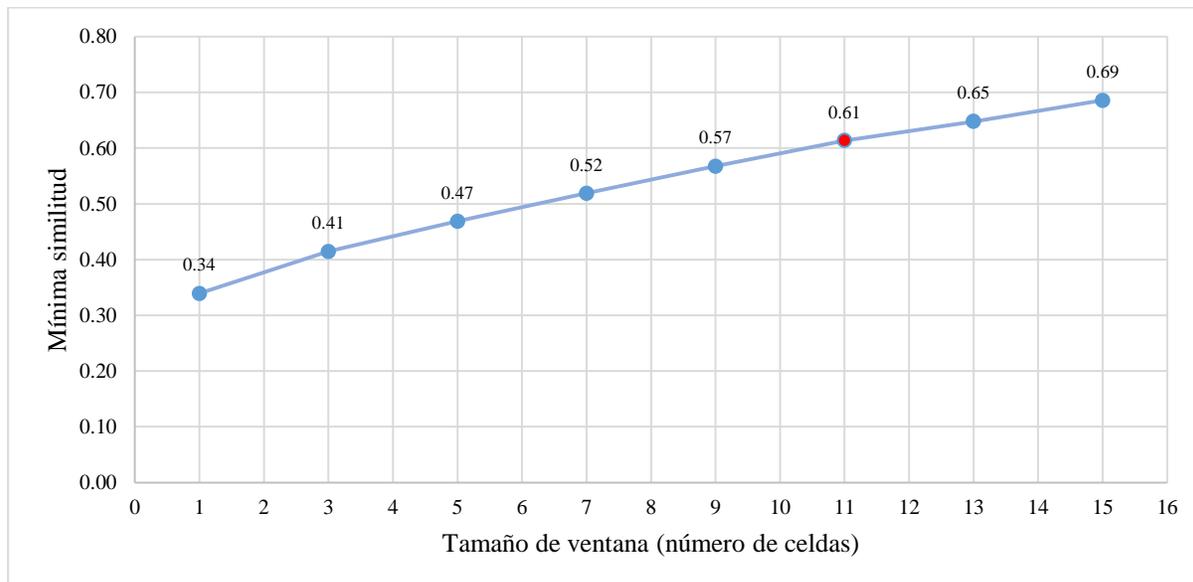
En la Tabla 13 se observan las medidas de la estructura del paisaje obtenidas para el uso de suelo urbano a través del software *Fragstats v4.2.1*. Los valores resultantes de área y dimensión fractal excluyeron a los parches de mayor tamaño que se modelan con la función *Expander*. Los parámetros utilizados para la función *Patcher* fueron una aproximación del promedio del área media y su varianza, es decir, los valores de 1,5 ha y 3 ha. La dimensión fractal promedio fue de 1,0568 debido a que es un valor muy cercano a 1 indica una forma simple de los parches, esto se tradujo como un valor de isometría de 2, es decir una forma poco compleja del parche. Los valores obtenidos para los parámetros de distancia al vecino más cercano e índice de cohesión de parche permitieron analizar la disposición espacial de los parches por lo que no se discriminaron los parches más grandes como para el cálculo anterior. La distancia al vecino más cercano indicó una distancia aproximada de 80,4561 m entre los parches, es importante recalcar que la distancia al parche más cercano incrementó a través de los años, esto puede ser explicado por el crecimiento disperso que ha caracterizado a Ibarra. El índice de cohesión de parche promedio fue de 99,4949, a pesar de que esto indica un paisaje poco fragmentado, el índice puede arrojar este valor debido a que, si bien los parches se encuentran dispersos entre sí, el toda el área urbana se asienta en una porción menor del área de estudio, lo que contribuye a aumentar el valor de este índice.

**Tabla 13**

*Medidas de la estructura del paisaje*

Año	Área (ha)		Índice de dimensión fractal	Distancia al vecino más cercano (m)	Índice de cohesión del parche
	Media	Varianza			
1996	1,377	2,917	1,055	69,447	99,212
2010	1,591	2,961	1,058	89,308	99,638
2016	1,655	3,340	1,058	82,614	99,635
Promedio	1,541	3,073	1,057	80,456	99,495

En la Figura 44 se muestra el resultado de la mínima similitud obtenida al ejecutar el modelo inicial de crecimiento urbano (1996-2010) con los pesos de evidencia de la Figura 43. Como se puede observar la similitud entre el mapa simulado y la realidad aumenta a medida que lo hace el tamaño de la ventana. A partir de la ventana de 7 celdas (70 x 70 m) se obtiene una similitud superior al 50% que permiten aceptar el modelo según Piontekowski et al. (2012) citado en Espinoza (2016). Para el caso del nivel de tolerancia de interés, es decir, la ventana de 11 celdas (aproximadamente una manzana urbana) se obtuvo una mínima similitud de 61.35 %.

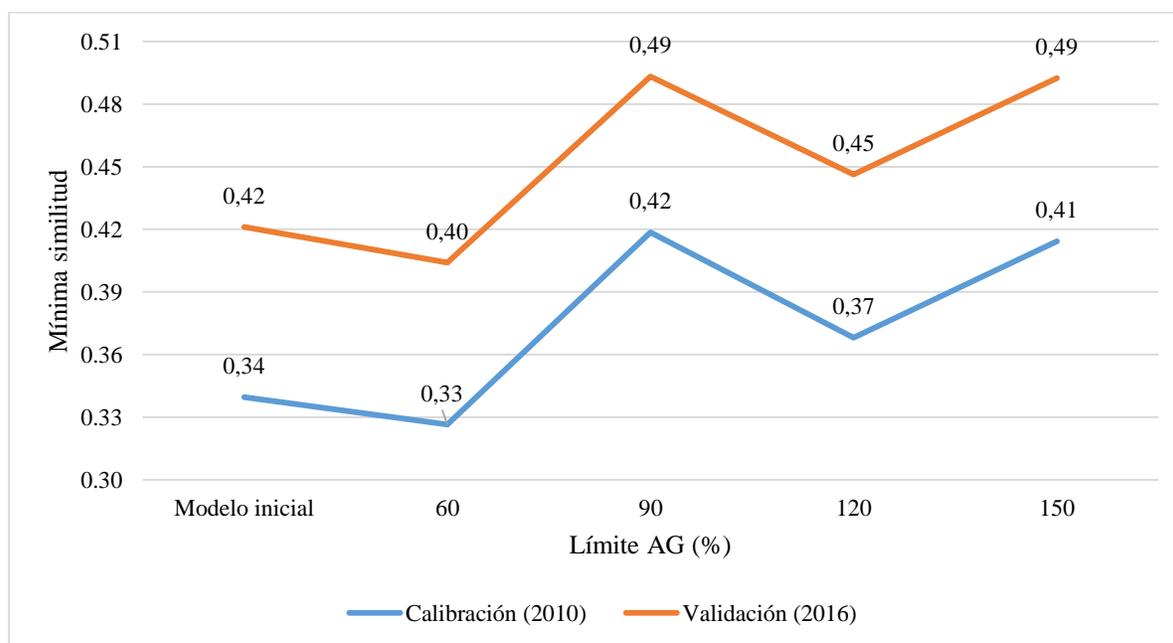


**Figura 44.** Gráfica de mínima similitud a diferentes tamaños de ventana para el modelo inicial 1996-2010

#### 4.3. Validación de modelos y comparación.

En la Figura 45 se muestran la similitud alcanzada por la optimización del modelo inicial de crecimiento urbano a través de algoritmos genéticos con los límites  $\pm 60, 90, 120, 150\%$ . En el gráfico se compara la capacidad de modelamiento en dos etapas: calibración (año 2010) y validación (año 2016). Con respecto a los pesos de evidencia del modelo inicial se puede apreciar

que el algoritmo con los límites del 60% no logró optimizar el modelo y su porcentaje de similitud bajó en ambas etapas. En el algoritmo con límite del 90% se observa un incremento considerable tanto para la etapa de calibración (41,86%) como para la de validación (49,32%), es decir, los pesos obtenidos consiguieron modelar de mejor manera la dinámica del crecimiento urbano y en el caso de la validación (año 2016) la similitud se apegó bastante al porcentaje mínimo necesario (50%) para aceptar el modelo a un nivel de tolerancia bastante estricto como es la ventana de una celda. Si bien la similitud alcanzada por el algoritmo con límites de 120% fue mejor que la del modelo inicial, se puede observar que existe un decremento con respecto al modelo de 90%, lo que puede deberse a que el parámetro de convergencia para algún peso se cumplió antes de completar las iteraciones previstas. El algoritmo de límite 150% presenta valores muy similares al algoritmo de 90% tanto en la etapa de calibración (49,25%) como en la de validación (41,43%). Si bien el algoritmo de 90% es superior esta diferencia es apenas notable.



**Figura 45.** Gráfica de mínima similitud al nivel de tolerancia de una celda, en las fases de calibración y validación.

Las hipótesis planteadas para la prueba de etapas de calibración y validación se presentan a continuación:

$$H_0: p_{90} = p_{150}$$

$$H_1: p_{90} \neq p_{150}$$

En la Tabla 14 se presenta el resultado del conteo de las celdas de los mapas de mínima similitud en diferentes épocas, donde  $n$  son el total de celdas que realizaron el cambio a urbana, y  $X$  el número de celdas que realizaron el cambio y que coinciden con el cambio real a un nivel de tolerancia de una celda.

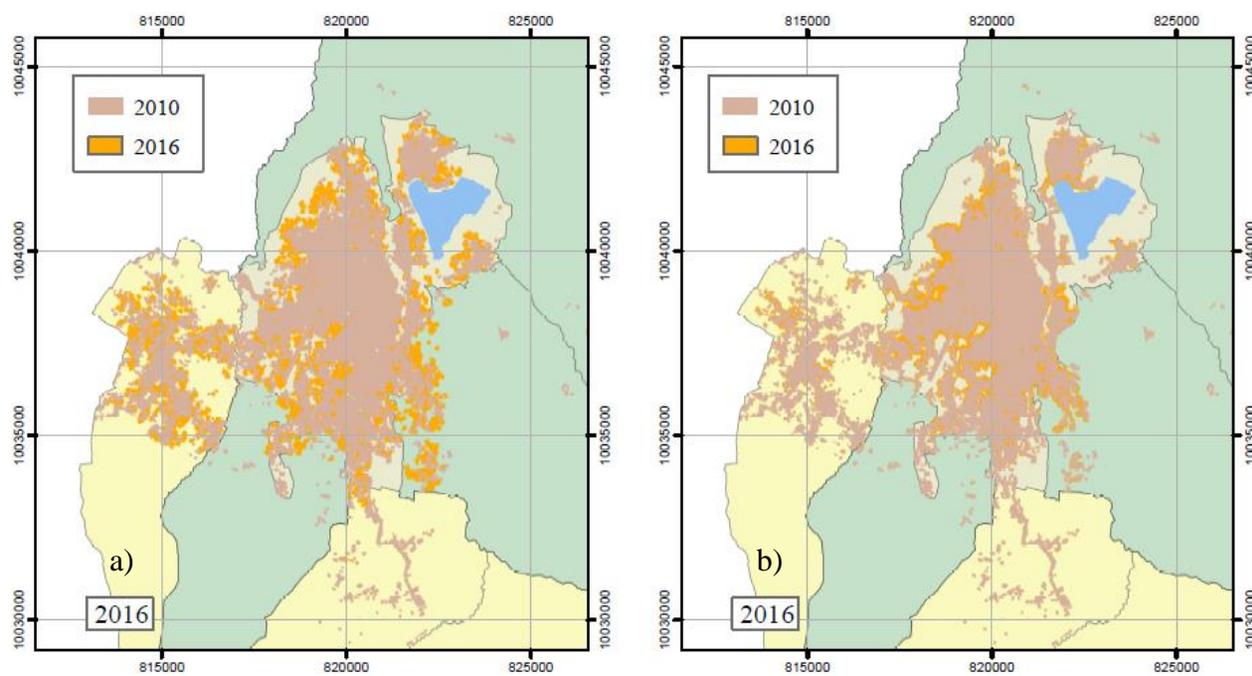
**Tabla 14**

*Conteo de celdas de los mapas de mínima similitud*

Parámetros	Calibración (2010)		Validación (2016)	
	<b>90</b>	<b>150</b>	<b>90</b>	<b>150</b>
X	48591	48098	84388	84266
n	116092	116092	171096	171096

Los estadísticos de prueba obtenidos fueron de 2,075 y 0,417 para las etapas de calibración y validación respectivamente. A un nivel de confianza del 95% y acorde al criterio  $z_0 > z_{\alpha/2}$  o  $z_0 < -z_{\alpha/2}$ . En la etapa de calibración se rechazó la hipótesis nula, es decir, existe diferencia entre los algoritmos 90 y 150% y el que tiene una mayor similitud (90%) es el que presenta el mejor ajuste. En la etapa de validación no se rechaza la hipótesis nula por lo que no existe una diferencia significativa y ambos modelos presentan el mismo ajuste. Debido a que el modelo del 90% presento un mejor ajuste en una de las etapas fue el escogido para su posterior comparación con el modelo de redes neuronales (LCM).

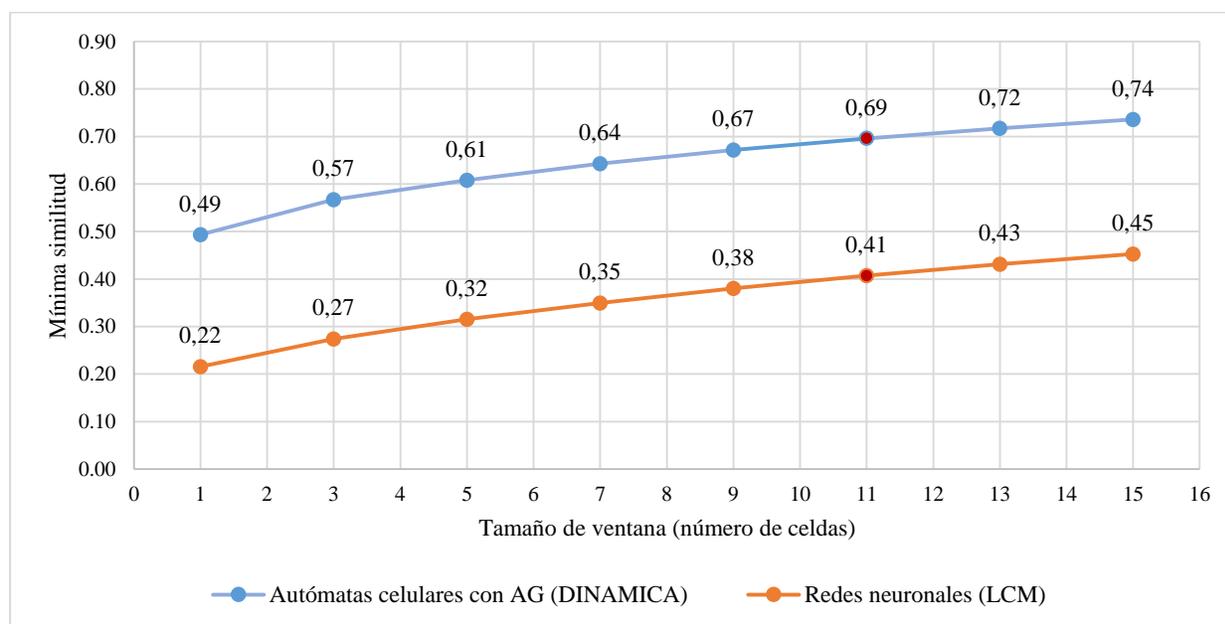
En la Figura 46 se muestra el mapa de crecimiento urbano al año 2016 generado por LCM (redes neuronales) y DINAMICA (autómatas celulares), si bien de manera visual LCM parece coincidir de mejor manera con el mapa real, se debe tomar en cuenta que LCM modela el crecimiento únicamente a partir del año 2010 mientras que DINAMICA realiza el modelamiento desde el año inicial (1996).



**Figura 46.** Mapas de crecimiento urbano al año 2016 de los modelos: a) autómatas celulares con AG (DINAMICA) y b) redes neuronales (LCM).

En la Figura 47 se presenta la mínima similitud obtenida de los cambios producidos por los modelos, de esta manera se pudo evaluar el desempeño real de los modelos para producir los cambios a diferentes niveles de tolerancia. La ventana de interés (11 celdas) presenta una mínima similitud del 69,59 % y de 40,68% para DINAMICA y LCM respectivamente. Esta amplia ventaja por parte del modelo de DINAMICA se puede explicar debido a la manera en que los modelos

asignan los cambios realizados, para el caso de LCM estos cambios se asignaron únicamente a las zonas de mayor probabilidad de transición sin importar el tamaño de los parches que se generen, mientras que en DINAMICA el ingreso de los parámetros: media, varianza e isometría, permitió controlar la forma y tamaño de los parches nuevos y de las franjas de crecimiento de los parches existentes, dando un resultado más aproximado a los patrones espaciales que se producen en el uso urbano. Otra ventaja que presentó DINAMICA es que permitió incorporar el conocimiento experto (modificación de la probabilidad de transición) y un enfoque automático mediante la optimización de los pesos de evidencia por medio de algoritmos genéticos, a diferencia del modelo de LCM donde la naturaleza exclusivamente automática de la red neuronal no permitió la modificación de los parámetros acorde a criterios que permitieran explicar de mejor manera el crecimiento. De esta manera se concluye que el modelo de autómatas celulares con AG es el que mejor modela el crecimiento urbano de Ibarra.



**Figura 47.** Mínima similitud a distintos niveles de tolerancia para los modelos de autómatas celulares con AG (DINAMICA) y redes neuronales (LCM)

#### 4.4. Generación de escenarios

En la Tabla 15 se muestran las hipótesis generadas por los expertos a partir de las variables claves para cada escenario. Las hipótesis tendenciales reflejaron el comportamiento histórico de las variables, las hipótesis positivas mostraron resultados probables de una visión encaminada al ordenamiento territorial y al correcto desarrollo de la zona, las hipótesis negativas en cambio reflejaron situaciones probables o presentes que pueden afectar de manera que el futuro suceda contrario a lo planificado.

**Tabla 15**  
*Variables claves e hipótesis*

<b>Variable clave</b>	<b>Hipótesis escenario tendencial</b>	<b>Hipótesis escenario positivo</b>	<b>Hipótesis escenario negativo</b>
<b>1) Crecimiento poblacional</b>	La población presenta un crecimiento de aproximadamente 3200 habitantes/año para el 2025	La población presenta un crecimiento de aproximadamente 2500 habitantes/año para el año 2025	La población presenta un crecimiento de aproximadamente 3400 habitantes/año, considerando la situación de la población migrante
<b>2) Desarrollo económico</b>	El área urbana dentro de la zona de uso comercial presenta un crecimiento de 95% en el año 2025	Tasa de crecimiento en el área comercial para su consolidación mayor al 95% considerando una dinámica comercial acelerada	El desarrollo económico se detiene (90%) o se produce de manera desordenada, sin permitir la consolidación del área dispuesta en la zonificación.
<b>3) Altura de edificaciones</b>	Del total de predios en la ciudad para el año 2025, un 90% presentan altura entre 1 y 2 pisos, el 10 % restante altura mayor o igual a 3 pisos	Considerando un crecimiento vertical de la ciudad, del total de predios para el año 2025, un 80% presentan altura entre 1 y 2 pisos, el 20 % restante altura mayor o igual a 3 pisos.	Predomina un crecimiento horizontal con construcciones a las afueras de la ciudad. 95% presentan altura entre 1 y 2 pisos, el 5 % restante altura mayor o igual a 3 pisos
<b>4) Crecimiento horizontal</b>	El crecimiento urbano es disperso y se produce a una velocidad de 92 ha/año al 2025	El crecimiento urbano se consolida y se produce a una velocidad 65 ha/año	El crecimiento urbano es disperso y se produce a una velocidad 110 ha/año
<b>5) Ordenanza y uso de ocupación de suelo</b>	El área ocupada por predios dentro de las zonas de restricción de uso (suelo no urbanizable) es de 37 ha para el año 2025	Se considera el cumplimiento estricto de la ordenanza que no permita la expansión de los predios se conservan las 35 ha ocupadas del año 2016.	Mayor a 60 ha de construcción en áreas consideradas de conservación especialmente en los páramos y zonas aledañas a los drenajes, lechos de río y la escasa existencia de bosque primario

En la Tabla 16 se observa las probabilidades simples determinadas por los expertos para la ocurrencia de las hipótesis. Debido a que las relaciones de poder entre los actores se consideraron iguales, la probabilidad simple de ocurrencia obtenida para cada hipótesis fue resultado del promedio de los criterios individuales de los expertos. En estas se observa una importante probabilidad de que las variables claves mantengan su comportamiento tendencial, excepto en la variable de crecimiento poblacional (1), donde la hipótesis negativa de un crecimiento mayor al esperado tiene mayor probabilidad de ocurrencia.

**Tabla 16**

*Probabilidad simple de ocurrencia de hipótesis dada por los expertos*

Escenario	Hipótesis	Expertos			Promedio
		1	2	3	
<b>Escenario Tendencial</b>	Hipótesis 1	0.7	0.7	0.5	0.63
	Hipótesis 2	0.8	0.9	0.8	0.83
	Hipótesis 3	0.9	0.9	0.9	0.9
	Hipótesis 4	0.9	0.8	1	0.9
	Hipótesis 5	0.9	0.7	1	0.87
<b>Escenario positivo</b>	Hipótesis 1	0.3	0.4	0.2	0.25
	Hipótesis 2	0.7	0.8	0.6	0.7
	Hipótesis 3	0.4	0.5	0.5	0.47
	Hipótesis 4	0.5	0.2	0.8	0.5
	Hipótesis 5	0.6	0.4	0.5	0.5
<b>Escenario negativo</b>	Hipótesis 1	0.8	0.8	0.8	0.8
	Hipótesis 2	0.3	0.3	0.5	0.4
	Hipótesis 3	0.6	0.7	0.8	0.7
	Hipótesis 4	0.7	0.9	0.7	0.7
	Hipótesis 5	0.5	0.5	0.8	0.6

La Tabla 17 presenta las probabilidades de ocurrencia de los escenarios tendenciales, negativos y positivos, considerando la probabilidad simple y condicional de ocurrencia. Para el caso de las hipótesis tendenciales, el escenario más probable (11111) es aquel en que se cumplen todas las hipótesis que se observan en la Tabla 15. Para el caso de las hipótesis negativas, el escenario con mayor probabilidad de ocurrencia fue el 11011, es decir, sin el cumplimiento de la tercera hipótesis de la variable clave altura de edificación referida al crecimiento vertical de la ciudad. El escenario

positivo más probable es el 01111, en este escenario no se considera realizable el disminuir el crecimiento poblacional a una tasa de 2500 habitantes/año considerada por los expertos. El escenario positivo posee una probabilidad de ocurrencia mucho más baja que los escenarios tendenciales y negativos.

**Tabla 17**

*Probabilidad de ocurrencia de escenarios tendencial, negativo y positivo.*

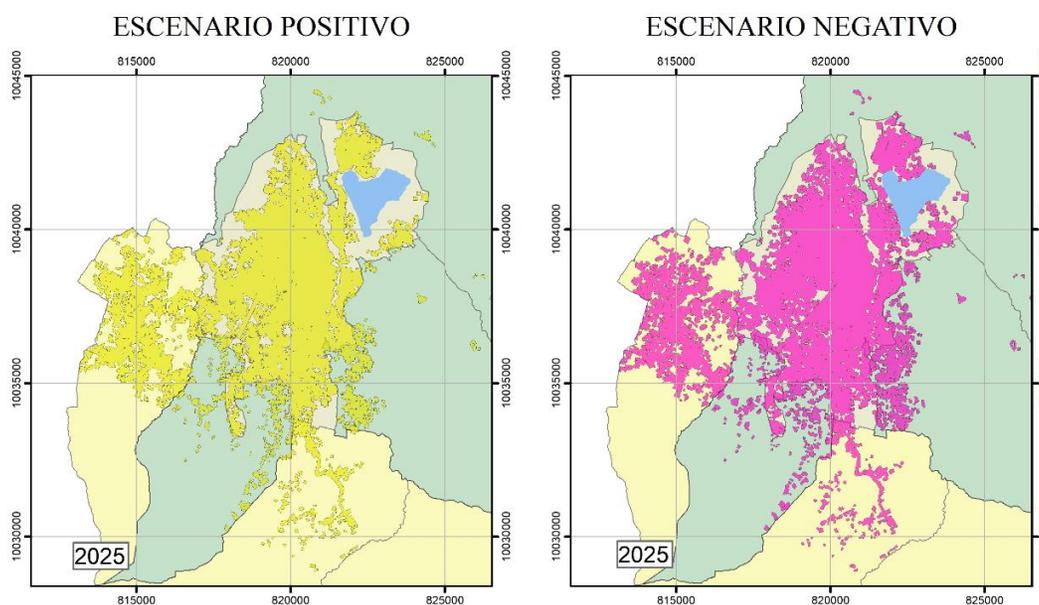
<b>ID</b>	<b>Tendencial</b>	<b>Negativo</b>	<b>Positivo</b>
11111	0.40	0.10	0.02
11110	0.07	0.08	0.03
11101	0.05	0.04	0.04
11100	0.01	0.02	0.03
10111	0.05	0.05	0.03
11010	0.01	0.03	0.04
11001	0.00	0.01	0.04
11000	0.00	0.01	0.03
11011	0.12	0.24	0.01
10110	0.01	0.06	0.02
10101	0.00	0.04	0.01
10100	0.00	0.01	0.03
10011	0.00	0.06	0.02
10010	0.00	0.01	0.03
10001	0.00	0.01	0.03
10000	0.00	0.00	0.04
01111	0.20	0.02	0.06
01110	0.05	0.02	0.05
01101	0.01	0.01	0.05
01100	0.00	0.01	0.03
01011	0.01	0.01	0.06
01010	0.00	0.01	0.03
01001	0.00	0.01	0.03
01000	0.00	0.03	0.01
00111	0.01	0.04	0.03
00110	0.00	0.02	0.03
00101	0.00	0.01	0.03
00100	0.00	0.01	0.03
00011	0.00	0.01	0.03
00010	0.00	0.00	0.03
00001	0.00	0.01	0.03
00000	0.00	0.00	0.01

La Tabla 18 presenta las condiciones que fueron introducidas en el modelo de simulación de autómatas celulares con AG para generar los mapas de escenarios tendenciales, positivos y negativos que se observan en la Figura 48, donde se aprecia el crecimiento horizontal urbano para el año 2025, con un área total ocupada de 4605 ha, 4443 ha y 4822 ha para los escenarios tendencial, positivo y negativo respectivamente, como consecuencia de la modificación de las tasas de transición.

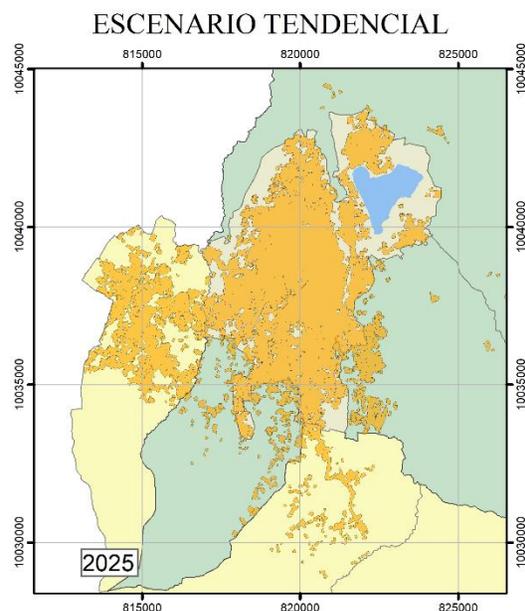
**Tabla 18**

*Condiciones para generación de mapas de escenarios de crecimiento urbano.*

Variable clave	Tendencial	Positivo	Negativo
<b>Desarrollo económico</b>	Sin modificación de la probabilidad de ocurrencia.	Aumento de la probabilidad de transición a 1 en el área comercial	Disminución de probabilidad de transición a 0 en el área comercial
<b>Crecimiento urbano</b>	Proporción realizada por <i>Expander</i> : 0,8 Tasa de transición: 0,0029	Proporción realizada por <i>Expander</i> : 1 Tasa de transición: 0,0023	Proporción realizada por <i>Expander</i> : 0,5 Tasa de transición: 0,0039
<b>Cumplimiento de la ordenanza</b>	Probabilidad se disminuyó a la mitad para evitar invasiones excesivas.	Disminución de la probabilidad de transición a 0 en el área de restricción	Sin modificación de la probabilidad de ocurrencia

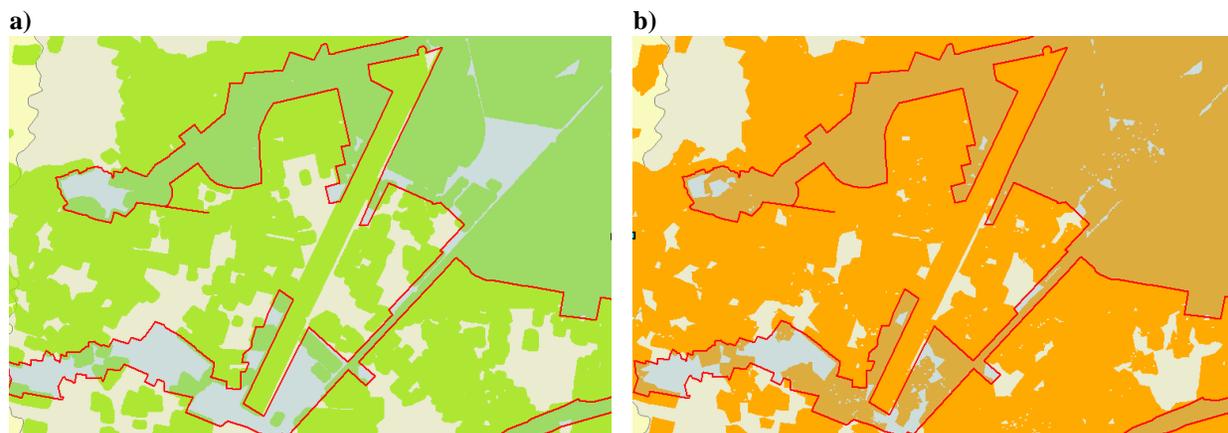


**CONTINÚA →**

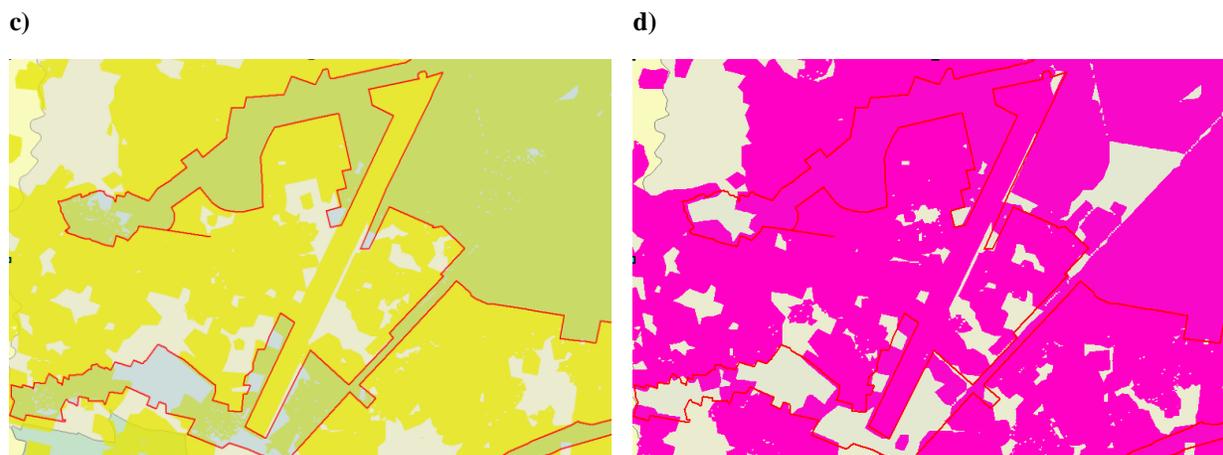


**Figura 48.** Escenarios tendencial, negativo y positivo

En la Figura 49 se observan los cambios simulados al año 2025 para el caso de la variable desarrollo económico, donde el área designada como zona comercial (zona delimitada en rojo), presenta un crecimiento y consolidación moderada (95%) para el escenario tendencial, un crecimiento y consolidación ligeramente mayor al tendencial (> 95%) para el escenario positivo, y ningún crecimiento (se mantiene 90% de consolidación del año 2016) para el escenario negativo.

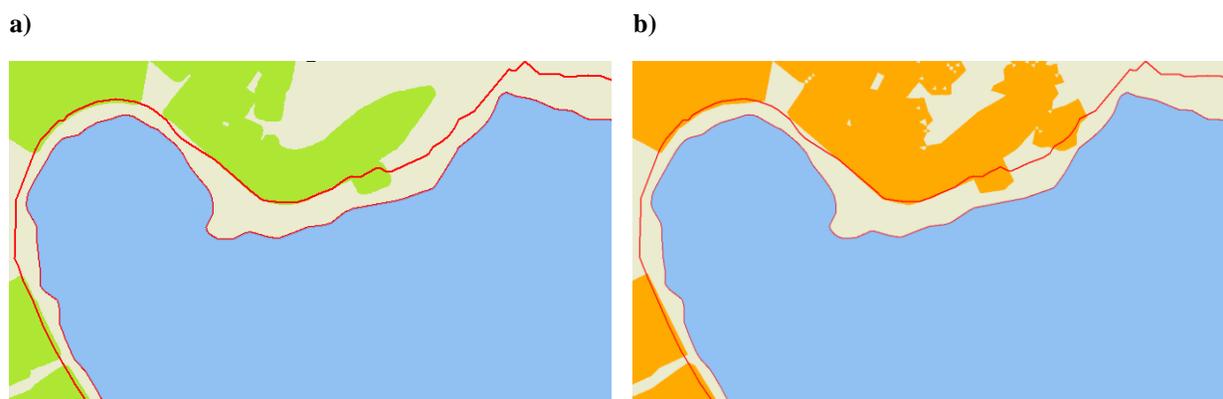


**CONTINÚA →**

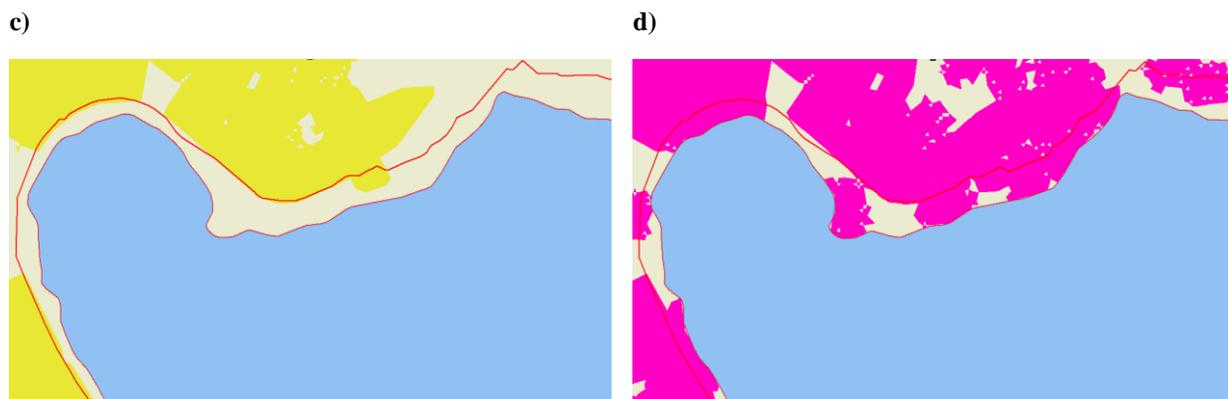


**Figura 49.** Desarrollo económico y consolidación del área urbana en la zona designada como comercial respecto al a) año 2016 para los escenarios b) tendencial, c) positivo y d) negativo al año 2025

En la Figura 50 se observan los cambios simulados al año 2025 para el caso de la variable cumplimiento de la ordenanza, donde dentro del área designada como franja de protección de la laguna (zona delimitada en rojo), existe un crecimiento ligero de la zona urbana para el escenario tendencial, ningún crecimiento de la zona urbana para el escenario positivo (se mantiene lo del año 2016), y un crecimiento alto de la zona urbana en esta franja de protección respecto a la del año 2016 para el escenario negativo.

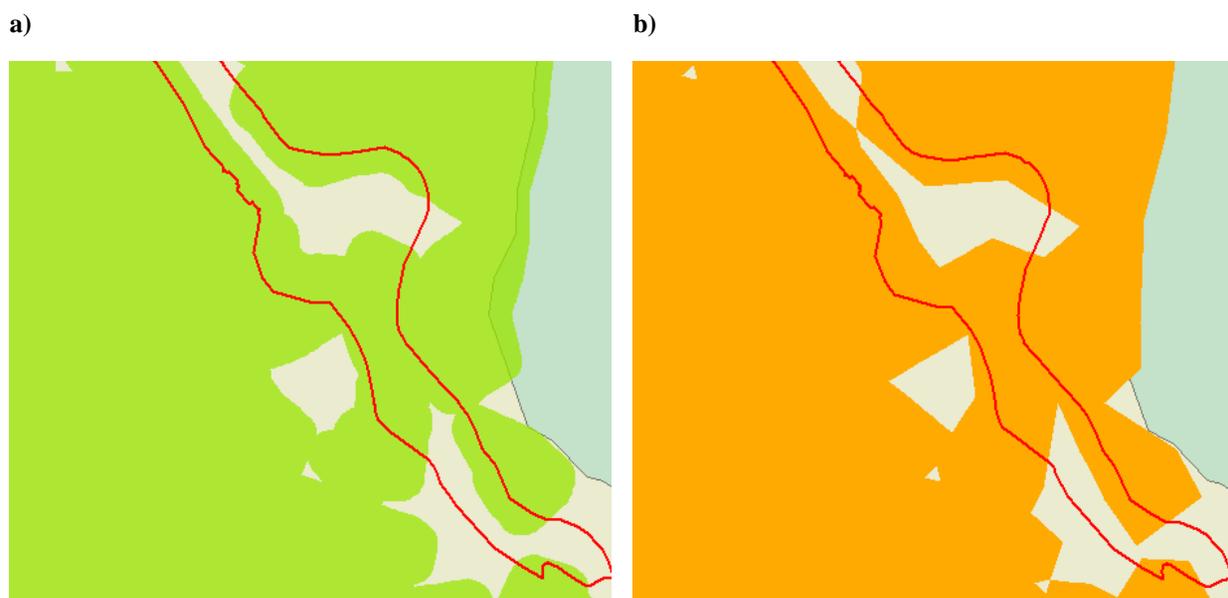


**CONTINÚA →**

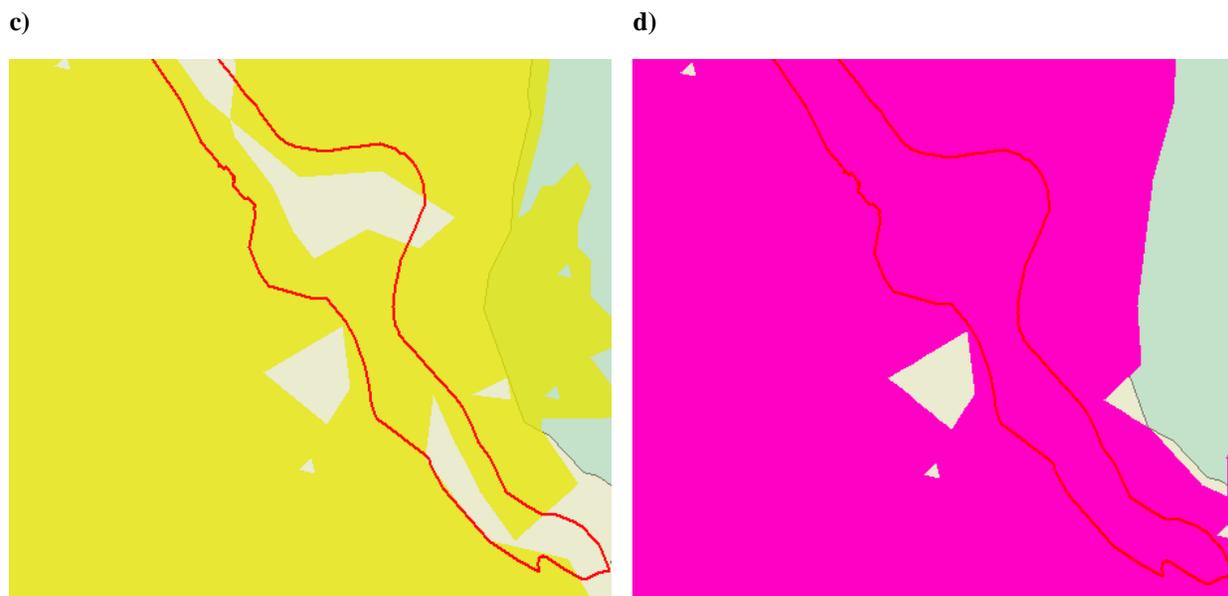


**Figura 50.** Cumplimiento de la ordenanza en la franja de protección de la laguna respecto al a) año 2016 para los escenarios b) tendencial, c) positivo y d) negativo al año 2025

En la Figura 51 se observa la simulación del uso urbano al año 2025, y su área en la franja de protección de quebradas del río Tahuando (zona delimitada en rojo), donde presenta un crecimiento ligero de la zona urbana para el escenario tendencial, ningún crecimiento de la zona urbana para el escenario positivo (se mantiene lo del año 2016), y un crecimiento alto de la zona urbana en esta área de protección (respecto al del año 2016) para el escenario negativo.



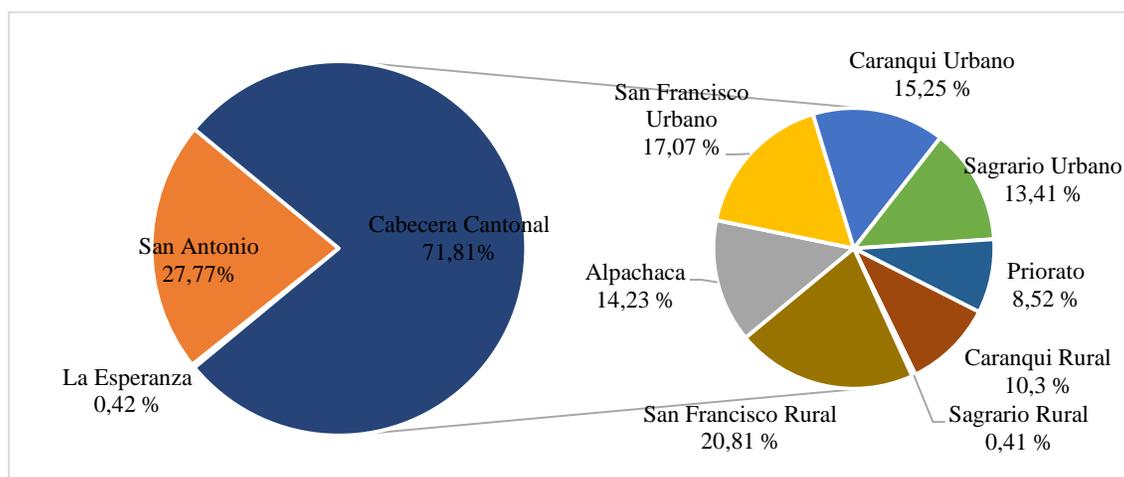
**CONTINÚA →**



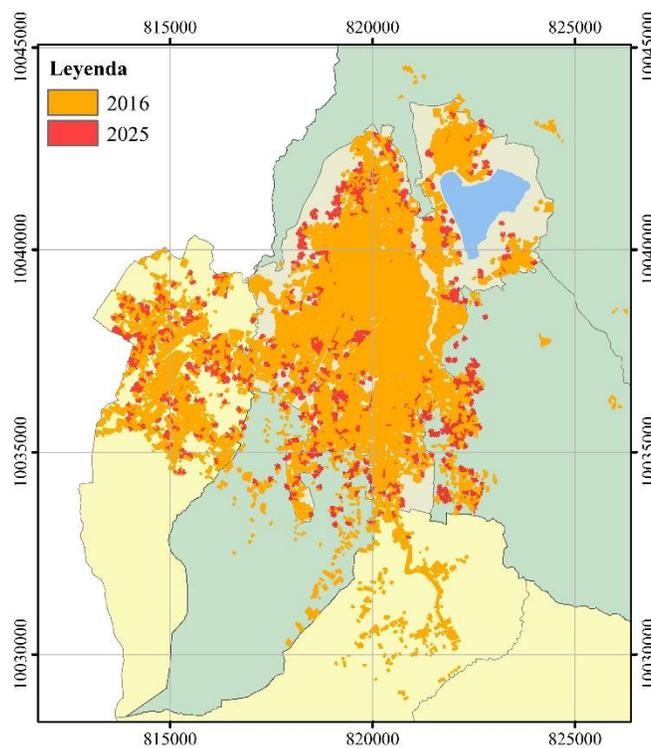
**Figura 51.** Cumplimiento de la ordenanza en la franja de protección de quebradas del río Tahuando respecto al a) año 2016 para los escenarios b) tendencial, c) positivo y d) negativo al año 2025

En lo que respecta a la totalidad de área ocupada por la zona urbana en el suelo designado como no urbanizable (restricción de uso) al año 2025, se tiene que la expansión de la zona urbana ocupa 37 ha para el escenario tendencial, se conservan las 35 ha ya ocupadas en este suelo no urbanizable en el año 2016 para el escenario positivo y 69 ha para el escenario negativo.

En la Figura 52 se observa la distribución por parroquias del crecimiento simulado para el año 2025 para el escenario tendencial (Figura 53), al comparar con el crecimiento producido en el periodo 1996-2016 (Figura 40) se puede apreciar que existe un incremento en el aporte generado por San Antonio, lo que indica un rápido crecimiento de esta parroquia debido a que presencia de condiciones favorables que aumentan la probabilidad de que se produzca la transición a urbano. Con respecto a la cabecera cantonal las parroquias Alpachaca y San Francisco rural presentan un incremento en su aporte a la urbanización.



**Figura 52.** Distribución del área de crecimiento por parroquias para el año 2025



**Figura 53.** Área de crecimiento para el período (2016-2025)

#### 4.5. Plan de uso y ocupación del suelo

En la Figura 54 se muestra la zonificación de usos de suelo generada para la mancha urbana del cantón que comprende la ciudad de Ibarra y los cantones San Antonio y La Esperanza.

MAPA DE ZONIFICACIÓN DE USO Y OCUPACIÓN DE SUELO DEL CANTÓN IBARRA AL AÑO 2025

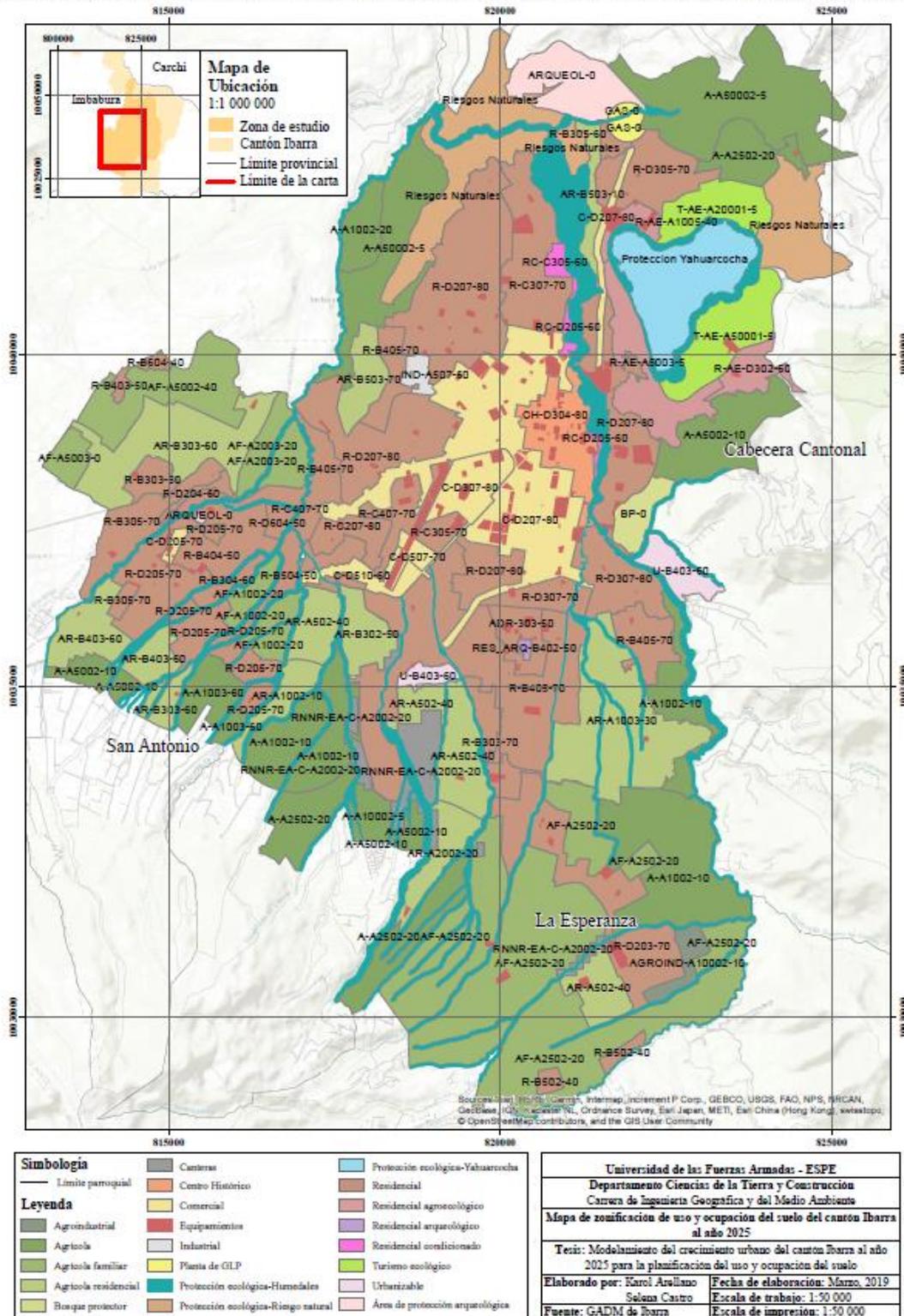


Figura 54. Mapa de zonificación de usos de suelo de Ibarra

En las Tablas 19 a 26 se muestran las propuestas de zonificación para los usos establecidos. Con respecto a los usos de protección ecológica de humedales, riesgo natural, Yahuarcocha, bosque protector y área de protección arqueológica no se establecieron parámetros debido a que en teoría en estos lugares no se debe construir. Tampoco se establecieron los parámetros para los usos canteras, equipamientos, industrial y planta de GLP ya que estos poseen condiciones específicas de implantación descritas por el GAD Municipal Ibarra (2015) en la ordenanza que regula el uso y ocupación del suelo del cantón Ibarra.

**Tabla 19***Propuesta de zonificación para el uso agrícola*

Codificación	Forma de ocupación	Lote mínimo	Retiros			Distribución de boques	Altura de edificación	COS	COS_T
			F	L	P				
A303-60	A	300	3	3	3	6	3	60	180
A403-60	A	400	3	3	5	6	3	60	180
A1003-60	A	1000	5	3	5	6	3	60	180
A1002-10	A	1000	5	3	5	6	2	10	20
A1002-20	A	1000	5	3	5	6	2	20	40
A2502-20	A	2500	5	3	5	6	2	20	40
A2501-10	A	2500	5	3	3	6	1	10	10
A2502-20	A	2500	5	3	5	6	2	20	40
A5002-10	A	5000	5	3	5	6	2	10	20
A10002-5	A	10000	5	3	5	6	2	5	10
A10002-10	A	10000	5	3	5	6	2	10	20
A25002-5	A	25000	5	3	5	6	2	5	10
A50002-5	A	50000	5	5	5	6	2	5	10

**Tabla 20***Propuesta de zonificación para el uso agroecológico*

Codificación	Forma de ocupación	Lote mínimo	Retiros			Distribución de bloques	Altura de edificación	COS	COS_T
			F	L	P				
A1005-40	A	1000	5	3	3	6	5	40	200
A5003-5	A	5000	5	5	5	6	3	5	15
D302-60	D	300	0	0	3	6	2	60	120

**Tabla 21***Propuesta de zonificación para el uso agrícola familiar*

Codificación	Forma de ocupación	Lote mínimo	Retiros			Distribución de bloques	Altura de edificación	COS	COS_T
			F	L	P				
A603-50	A	600	5	3	5	6	3	50	150
A1002-20	A	1000	5	3	5	6	2	20	40
A2002-20	A	2000	5	3	5	6	2	20	40
A2003-30	A	2000	5	3	5	6	3	30	90
A2003-20	A	2000	5	3	5	6	3	20	60
A2502-20	A	2500	5	3	5	6	2	20	40
A2502-40	A	2500	5	3	5	6	2	40	80
A5001-5	A	5000	3	3	3	6	1	5	5
A5002-40	A	5000	3	3	3	6	2	40	80
A5002-10	A	5000	5	3	5	6	2	10	20

**Tabla 22***Propuesta de zonificación para el uso agrícola residencial*

Codificación	Forma de ocupación	Lote mínimo	Retiros			Distribución de bloques	Altura de edificación	COS	COS_T
			F	L	P				
A502-40	A	500	3	3	3	6	2	40	80
A503-50	A	500	5	3	3	6	3	50	150
A1002-20	A	1000	5	3	3	6	2	20	40
A1002-40	A	1000	3	3	3	6	2	40	80
A1002-10	A	1000	5	3	5	6	2	10	20
A1003-30	A	1000	3	3	3	6	3	30	90
A2002-20	A	2000	5	3	5	6	2	20	40
A2501-10	A	2500	5	3	3	6	1	10	10
A5002-20	A	5000	5	3	5	6	2	20	40
B202-50	B	200	3	3	3	6	2	50	100
B303-60	B	300	3	3	3	6	3	60	180
B302-50	B	300	3	3	3	6	2	50	100
B403-60	B	400	3	3	3	6	3	60	180
B402-60	B	400	5	3	5	6	2	60	120
B503-50	B	500	5	3	3	6	3	50	150
B503-10	B	500	3	3	3	6	3	10	30
B503-70	B	500	3	3	3	6	3	70	210
B603-40	B	600	5	3	5	6	3	40	120
B1002-40	B	1000	5	3	3	6	2	40	80

**Tabla 23***Propuesta de zonificación para el uso residencial*

Codificación	Forma de ocupación	Lote mínimo	Retiros			Distribución de bloques	Altura de edificación	COS	COS_T
			F	L	P				
<b>B304-60</b>	B	300	3	3	3	6	4	60	240
<b>B303-60</b>	B	300	3	3	3	6	3	60	180
<b>B303-70</b>	B	300	0	0	3	6	3	70	210
<b>B305-70</b>	B	300	3	3	3	6	5	70	350
<b>B305-60</b>	B	300	3	3	3	6	5	60	300
<b>B403-50</b>	B	400	3	3	3	6	3	50	150
<b>B404-50</b>	B	400	3	3	3	6	4	50	200
<b>B405-70</b>	B	400	3	3	3	6	5	70	350
<b>B403-60</b>	B	400	3	3	3	6	3	60	180
<b>B405-70</b>	B	400	3	3	3	6	5	70	350
<b>B503-50</b>	B	500	5	3	5	6	3	50	150
<b>B504-50</b>	B	500	3	3	3	6	4	50	200
<b>B502-40</b>	B	500	5	3	3	6	2	40	80
<b>B604-40</b>	B	600	3	3	3	6	4	40	160
<b>B603-50</b>	B	600	3	3	3	6	3	50	150
<b>C204-60</b>	C	200	3	0	3	6	4	60	240
<b>C207-80</b>	C	200	3	0	3	6	7	80	560
<b>C307-70</b>	C	300	3	0	3	6	7	70	490
<b>C305-70</b>	C	300	3	0	3	6	5	70	350
<b>C404-50</b>	C	400	3	3	3	6	4	50	200
<b>C407-70</b>	C	400	3	0	3	6	7	70	490
<b>D203-70</b>	D	200	0	0	3	6	3	70	210
<b>D205-70</b>	D	200	0	0	3	6	5	70	350
<b>D204-70</b>	D	200	0	0	3	6	4	70	280
<b>D203-70</b>	D	200	0	0	3	6	3	70	210
<b>D205-70</b>	D	200	0	0	3	6	5	70	350
<b>D204-60</b>	D	200	0	0	3	6	4	60	240
<b>D207-80</b>	D	200	0	0	3	6	7	80	560
<b>D304-70</b>	D	300	0	0	3	6	4	70	280
<b>D303-70</b>	D	300	0	0	3	6	3	70	210
<b>D305-70</b>	D	300	0	0	3	6	5	70	350
<b>D307-80</b>	D	300	0	0	3	6	7	80	560
<b>D604-50</b>	D	600	0	0	3	6	4	50	200
<b>DC303-50</b>	DC	300	5	3	3	6	3	50	150

**Tabla 24***Propuesta de zonificación para el uso residencial condicionado*

Codificación	Forma de ocupación	Lote mínimo	Retiros			Distribución de bloques	Altura de edificación	COS	COS_T
			F	L	P				
<b>C305-60</b>	C	300	3	0	3	6	5	60	300
<b>D205-60</b>	D	200	0	0	3	6	5	60	300
<b>D205-60</b>	D	200	0	0	3	6	5	60	300

**Tabla 25***Propuesta de zonificación para el uso comercial*

Codificación	Forma de ocupación	Lote mínimo	Retiros			Distribución de bloques	Altura de edificación	COS	COS_T
			F	L	P				
<b>D205-70</b>	D	200	0	0	3	6	5	70	350
<b>D207-80</b>	D	200	0	0	3	6	7	80	560
<b>D307-80</b>	D	300	0	0	3	6	7	80	560
<b>D510-60</b>	D	500	0	0	3	6	10	60	600
<b>D507-70</b>	D	500	0	0	3	6	7	70	490

**Tabla 26***Propuesta de zonificación para otros usos*

Codificación	Forma de ocupación	Lote mínimo	Retiros			Distribución de bloques	Altura de edificación	COS	COS_T
			F	L	P				
<b>Uso: Agroindustrial</b>									
<b>A10002-1</b>	A	10000	5	5	5	6	2	1	2
<b>Uso: Canteras</b>									
<b>A2002-20</b>	A	2000	5	3	5	6	2	20	40
<b>Uso: Centro histórico</b>									
<b>D304-80</b>	D	300	0	0	3	6	4	80	320
<b>Uso: Industrial</b>									
<b>A1008-60</b>	A	1000	5	3	3	6	8	60	480
<b>Uso: Residencial arqueológico</b>									
<b>DC402-50</b>	DC	400	5	3	3	6	2	50	100
<b>Uso: Turismo ecológico</b>									
<b>A20001-5</b>	A	20000	5	5	5	6	1	5	5
<b>A50001-5</b>	A	50000	5	5	5	6	1	5	5

## CAPITULO V

### 5.1. CONCLUSIONES

Del análisis multitemporal de la zona de estudio se evidenció un crecimiento de 1709,823 ha entre los años 1996 y 2016. Esta área representa un crecimiento de aproximadamente el 78% respecto a la mancha urbana inicial. El 73,77% del crecimiento se produjo en la cabecera cantonal, el 20,96% en la parroquia rural de San Antonio y el 5.27% en la Esperanza. Además, de la comparación de la mancha urbana del año 2016 con los usos establecidos en el año 2010 por el GAD Municipal de Ibarra se identificó como principales coberturas afectadas a las áreas de cultivos y pastos.

Del análisis de la correlación espacial de las 13 variables explicativas utilizadas en los modelos multivariantes (autómatas celulares y redes neuronales) se concluye que muestran una dependencia con el uso urbano, pero son independientes entre sí, por lo que presentan un buen potencial explicativo para el modelamiento del crecimiento urbano de Ibarra.

El modelamiento del crecimiento urbano por medio de redes neuronales (LCM) permitió establecer el potencial de transición a través de un análisis global de las variables explicativas, mientras que el modelo de autómatas celulares (DINAMICA) se basó en el cálculo de pesos de evidencia por rangos para cada variable. Si bien las redes neuronales permiten relacionar todas las variables a través de un conjunto de operaciones que se realizan por un mecanismo de caja negra, esto no siempre es ventajoso ya que no se puede integrar el conocimiento experto en la obtención del potencial de transición. En este sentido DINAMICA ofrece la opción de mantener un enfoque completamente automático mediante la optimización de los pesos o la modificación de los mismos por intervención de expertos.

La optimización de pesos de evidencia por medio de algoritmos genéticos con límites de  $\pm 90\%$  de su valor inicial permitió al modelo de autómatas celulares generar mejores simulaciones a futuro, aumentando la similitud del modelo con la realidad en un 7.9% en la etapa de calibración (2010) y 7.2% en la etapa de validación (2016) para un nivel de tolerancia estricto como es la ventana de una celda.

A través del cálculo de la mínima similitud se realizó la comparación de los modelos multivariable (año 2016) a diferentes tamaños de ventana, de lo cual se concluye que el modelo de autómatas celulares con AG presenta una mejor similitud con la realidad respecto al modelo de redes neuronales, superándolo ampliamente con un 28.91% para la ventana de interés de 11 celdas (una manzana urbana). Con esto el crecimiento urbano de Ibarra alcanzó una similitud con la realidad del 69,6% con el mejor modelo ajustado.

La modificación de los parámetros del modelo de AC con AG permitió la generación de escenarios prospectivos al año 2025 (positivo, negativo y tendencial) considerando no únicamente las 13 variables explicativas cartografiadas sino también factores internos y externo que de alguna manera modificaron la dinámica del territorio acorde al criterio de expertos.

La propuesta de Plan de Uso y Ocupación del suelo al año 2025 se planteó en base al escenario tendencial de crecimiento para generar usos y establecer parámetros de edificación más apropiados a la realidad del suelo urbanizado, que permitan un correcto aprovechamiento de los equipamientos y eviten el crecimiento hacia zonas agrícolas y de riesgo.

## 5.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda que la generación de modelos de simulación de crecimiento urbano este siempre respaldada de los criterios de expertos y actores que conozcan tantos los factores internos y externos que influyen en el fenómeno del crecimiento urbano como las características propias de la zona de estudio.

En cuanto a la información, se recomienda a las autoridades competentes manejar una base de datos mejor estructurada ya que la información que se posee puede ser de gran ayuda para estudios en beneficio del desarrollo del cantón.

Se recomienda que para la generación de los modelos de simulación se incluyan proyectos futuros de infraestructura y equipamientos ya que estos pueden influenciar en gran medida el potencial del suelo para cambiar de uso a urbano.

Para estudios relacionados al crecimiento urbano, se recomienda incluir factores de tipo social y económico que si bien no siempre se pueden cartografiar tienen una importante influencia en el desarrollo de zonas urbanas.

Para las autoridades competentes se recomienda que al momento de realizar una planificación se tome en consideración los posibles escenarios futuros de crecimiento urbano y en base a ello considerar medidas que permitan el correcto desarrollo de las zonas urbanas que permitan optimizar los recursos del municipio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera. (2006). Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares. *GeoFocus*(6), 81-112.
- Aguilera Benavente, F., Valenzuela Montes, L., & Bosque Sendra, J. (2010). Simulación de escenarios futuros en la aglomeración urbana de Granada a través de modelos basados en autómatas celulares. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*(54), 271-300.
- Aguilera, F., Gómez, M., & Cantergiani, C. (2010). Instrumentos de simulación prospectiva del crecimiento urbano. *Ciudad y Territorio - Estudios Territoriales*, 481-495. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/261296148\\_Instrumentos\\_de\\_simulacion\\_prospectiva\\_del\\_crecimiento\\_urbano](https://www.researchgate.net/publication/261296148_Instrumentos_de_simulacion_prospectiva_del_crecimiento_urbano)
- Alvárez, G. (2010). El crecimiento urbano y estructura urbana en las ciudades medias mexicanas. *Quivera*, 12(2), 94-114. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/401/40115676006.pdf>
- Barreira, P., Gómez, M., & Aguilera, F. (2015). Simulación del crecimiento urbano y modelos basados en autómatas celulares: el uso de parcelas catastrales vectoriales a partir de la teoría de grafos. *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación*, 511-520.
- Berdoulay, V. (2009). La historia de la geografía en el desafío de la prospectiva. *Boletín de la A.G.E*(51), 9-23.
- Berling-Wolf, S., & Wu, J. (2004). Modelling urban landscape dynamics: A review. *Ecological Research*(19), 119-129.
- Cely, A. (1999). Metodología de los Escenarios para Estudios Prospectivos. *Revista Ingeniería e Investigación*(44), 26-35.
- Cervantes, F., & Cedeño, S. (2014). *Plan estratégico para enfrentar la problemática del crecimiento demográfico del cantón Santo Domingo, análisis prospectivo*. Tesis de Maestría en Gerencia Empresarial, Universidad Politécnica Nacional, Facultad de Ciencias Administrativas, Quito. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/8937>
- Cifuentes, P., & Londoño, J. P. (2010). Análisis del crecimiento urbano: Una aproximación al estudio de los factores del crecimiento de la ciudad de Manizales como aporte a la planificación. *Gestión y Ambiente*, 13(1), 53-66.
- Delgado, O., Toledo, E., Quinde, T., & Vélez, B. (2017). Planificación Territorial a través de las categorías de ordenación de uso y ocupación del suelo. Caso cantón Pucará, Azuay. *Revista Geoespacial*, 14(1), 13-31.

- Díaz, J., & Hewitt, R. (2013). Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software. *GeoFocus*(14), 1-22. Obtenido de [http://geofocus.rediris.es/2014/Articulo1\\_2014.pdf](http://geofocus.rediris.es/2014/Articulo1_2014.pdf)
- Eastman, R. (2012). *Idrisi selva: Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes*. Clark University. USA: Idrisi Production. Obtenido de <http://clarklabs.org/wp-content/uploads/2016/10/IDRISI-Selva-Spanish-Manual.pdf>
- Espinoza, V. (2016). Dinamica EGO: una herramienta gratuita para modelar y brindar soporte en el análisis del CCUS. *National Scientific and Technical Research Council*, 1-20.
- Fernández, J. (2015). *La ordenación del territorio en las ciudades*. Obtenido de El planeamiento urbano: <https://es.scribd.com/document/292589867/MODELOS-DE-CRECIMIENTO-URBANO>
- Frediani, J. (2006). *Modelos urbanos: La ciudad compacta y la ciudad difusa. Su análisis a través de las redes de servicios y transporte en el partido de la Plata*. Universidad Nacional de la Plata, La Plata. Obtenido de [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/40375/Documento\\_completo.pdf?sequence=1](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/40375/Documento_completo.pdf?sequence=1)
- GAD Municipal de Ibarra. (2015). *Actualización del plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón Ibarra 2015-2023*. Obtenido de [http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL\\_SNI/data\\_sigad\\_plus/sigadplusdocumentofinal/1060000260001\\_PD%20Y%20OT%20IBARRA%20UNIFICADO%20004\\_13-03-2015\\_17-34-44.pdf](http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdocumentofinal/1060000260001_PD%20Y%20OT%20IBARRA%20UNIFICADO%20004_13-03-2015_17-34-44.pdf)
- GAD Municipal Ibarra. (2015). *Ordenanza de uso y ocupación del suelo del cantón Ibarra*.
- GAD Municipal Ibarra. (2015). *Ordenanza que regula el uso y ocupación del suelo en el cantón de Ibarra*. Ibarra, Ecuador .
- GAD Municipal San Miguel de Ibarra. (2014). *Ibarra es erigida en ciudad*. Obtenido de [ibarra.gob.ec](http://ibarra.gob.ec): <https://issuu.com/ibarraec>
- GAD Municipal San Miguel de Ibarra. (2019). *Continúa socialización de nueva de Ordenanza de Uso del Suelo*. Obtenido de <https://www.ibarra.gob.ec/web/index.php/component/tags/tag/uso-de-suelo>
- Gómez, M., Aguilera, F., Barreira, P., Bosque, J., & Rodríguez, V. (2014). Simulación prospectiva del crecimiento urbano en la Comunidad Autónoma de Madrid a partir de modelos basados en autómatas celulares y modelos basados en EMC. *Tecnologías de la información para nuevas formas de ver el territorio: XVI Congreso Nacional de Tecnologías de Información Geográfica*, 27-37.

- Gregório, R. (2011). *Modelos de Ciudad (Ciudad compacta, Ciudad difusa)*. Facultad de Letras y Ciencias Humanas Geografía y Medio Ambiente, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima. Obtenido de <https://es.slideshare.net/ritagandrade/modelos-de-ciudad>
- Gutiérrez, J., Gómez, M., & Bosque, J. (2010). *Simulación de crecimiento urbano mediante evaluación multicriterio y tig en el Gran San Miguel de Tucuman (Argentina)*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3396209>
- Hengl, T. (2006). Finding the right pixel size. *Computers & Geosciences*, 32(9), 1283-1298. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300405002657>
- Herrera, M. B. (2011). *Caracterización de los sistemas vinculados al ordenamiento territorial en la zona urbana del cantón Ibarra (Tesis de pregrado)*. Tesis Pregrado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito.
- INEC. (2010). *Instituto Nacional de Estadísticas y Censos*. Obtenido de Población por área, según provincia, cantón y parroquia de empadronamiento: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/plugins/download-monitor/download.php?id=322&force=0>
- Leija, E., Reyes, H., Reyes, O., Flores, J., & Sahagún, F. (2016). Cambios en la cubierta vegetal, usos de la tierra y escenarios futuros en la región costera del estado de Oaxaca, México. *Madera y Bosques*, 22(1), 125-140.
- LOOTUGS. (2016). *Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión del Suelo*. Registro Oficial No. 790, Quito, Ecuador .
- López, M. F. (2015). El sistema de planificación y el ordenamiento territorial para Buen Vivir en el Ecuador. *Geosp – Espaço e Tempo (Online)*, 19(2), 297-312. Obtenido de [http://www.flacsoandes.edu.ec/system/tdf/%25f/agora/files/agora\\_lopez.pdf?file](http://www.flacsoandes.edu.ec/system/tdf/%25f/agora/files/agora_lopez.pdf?file)
- Mas, J.-F., Kolb, M., Houet, T., Paegelow, M., & Camacho, M. (2011). Una comparacion de programas de modelacion de cambios de cobertura/uso del suelo. *XV Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*.
- McGarigal, K. (2015). *Fragstats help*. University of Massachusetts, Department of Environmental Conservation. Obtenido de <https://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/documents/fragstats.help.4.2.pdf>
- Montgomery, D., & Runger, G. (2002). *Probabilidad y estadística aplicada a la ingeniería*. McGraw-Hill.
- Municipio DMQ. (2003). *Anexo a la Ordenanza de zonificación que contiene el Plan de uso y ocupación de suelo*. Quito. Obtenido de [http://www7.quito.gob.ec/mdmq\\_ordenanzas/Ordenanzas/ORDENANZAS%20A%C3%9](http://www7.quito.gob.ec/mdmq_ordenanzas/Ordenanzas/ORDENANZAS%20A%C3%9)

10S%20ANTERIORES/ORDZ-008%20-%20PUOS%20-%20PLAN%20DE%20USO%20Y%20OCUPACION%20DEL%20SUELO.pdf

- Naranjo, M., Dávalos, M., Batallas, B., Granja, J., Velarde, E., Rosales, O., . . . Portilla, K. (2013). Análisis de vulnerabilidad cantón San Miguel de Ibarra.
- Nogués, S., & Salas, H. (2009). *Modelos de crecimiento urbano. Estrategias de planificación y sostenibilidad en Cantabria*. Universidad Politécnica de Catalunya, Geografía, Urbanismo y Ordenación del Territorio. Cantabria: Universidad Politécnica de Catalunya. Obtenido de <http://hdl.handle.net/2099/11341>
- PNUD. (2015). *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo: Ciudades y comunidades sostenibles*. Obtenido de <http://www.latinamerica.undp.org/content/rblac/es/home/post-2015/sdg-overview/goal-11.html>
- Polidori, M., Saraiva, M., Peres, O., Toralles, C., & Tomiello, F. (2015). Los bordes de la ciudad y la simulación del crecimiento urbano con autómatas celulares. *Revista Ciencias Espaciales*, 8(2).
- Reyna, A., Reyna, J., & Vences, C. (2017). Escenarios de crecimiento urbano 2017 y 2022 de la ciudad de Portoviejo, Manabí-Ecuador. *Revista San Gregorio*. Obtenido de <http://revista.sangregorio.edu.ec/index.php/REVISTASANGREGORIO/article/view/382/pdf>
- Robredo, E. (2013). *Construcción de un modelo predictivo para el comportamiento de cambio de uso de suelo en la región de Chamela-Cuixmala, en la costa de Jalisco, utilizando programación genética y autómatas celulares. (Tesis de posgrado)*. Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., México .
- Sanabria, T., & Ramírez, J. (2017). Ciudad compacta vs. ciudad difusa. (U. N. Nordeste, Ed.) *Cuaderno Urbano. Espacio, Cultura, Sociedad*, 22(22), 29-52. Obtenido de <http://www.scielo.org.ar/pdf/cuba/v22n22/v22n22a02.pdf>
- Santana, M. (2014). Obtenido de Modelo de crecimiento urbano: <https://es.slideshare.net/axtiram/modelos-de-crecimiento-urbano>
- Sapena, M., Ruiz, L., & Joó, K. (2017). Modelos de simulación de expansión urbana a partir de imágenes de satélite: Adecuación al análisis temporal de la fragmentación de los usos del suelo. *XVII Congreso de la Asociación Española de Teledetección*, 311-314.
- SENPLADES. (2015). *Guía Metodológica para la elaboración de Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de los Gobiernos Autónomos Descentralizados* .
- Shan, J., Alkheder, S., & Wang, J. (2008). Genetic algorithms for the calibration of cellular automata urban growth modeling. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 74(10), 1267–1277.

- Silveira, B., Corradi, L., Coutinho, G., & Leite, W. (2003). Simulating the spatial patterns of change through the use of the DINAMICA model. *Anais XI SBSR*.
- Soares-Filho, B., Rodrigues, H., & Costa, W. (2009). *Building a land-use and land-cover change simulation model*. Obtenido de [https://csr.ufmg.br/dinamica/dokuwiki/doku.php?id=tutorial:building\\_a\\_land-use\\_and\\_land-cover\\_change\\_simulation\\_model](https://csr.ufmg.br/dinamica/dokuwiki/doku.php?id=tutorial:building_a_land-use_and_land-cover_change_simulation_model)
- Soares-Filho, B., Rodrigues, H., & Costa, W. (2009). *Heuristic calibration of models by using Genetic Algorithm*. Obtenido de [https://csr.ufmg.br/dinamica/dokuwiki/doku.php?id=tutorial:heuristic\\_calibration\\_of\\_models\\_by\\_using\\_genetic\\_algorithm](https://csr.ufmg.br/dinamica/dokuwiki/doku.php?id=tutorial:heuristic_calibration_of_models_by_using_genetic_algorithm)
- Soto, J. (2015). El crecimiento urbano de las ciudades: enfoques desarrollista, autoritario, neoliberal y sustentable. *Paradigma económico*(1), 127-149.
- Ticona, E. (2015). *Modelo de crecimiento de la mancha urbana de la ciudad de El Alto usando autómatas celulares (Tesis de pregrado)*. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.
- Yerovi, C. (2016). *Escenarios de crecimiento suburbano utilizando técnicas de "Evaluación Multicriterio" en la administración zonal Tumbaco del Distrito Metropolitano de Quito (Tesis de pregrado)*. Quito.
- Zanipatín, K. (2014). *Modelamiento de crecimiento urbano de la ciudad de Machachi para la planificación de servicios básicos con el uso de herramientas SIG*. Tesis pregrado, Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Departamento Ciencias de la Tierra y la Construcción, Quito. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/8727>