

Utilización de autómatas celulares como técnica de modelamiento espacial para determinación el cambio de uso de suelo y cobertura vegetal

Oswaldo Padilla, Pablo Pérez, Mario Cruz,
Sylvia Huilcamaigua, Susana Astudillo

Resumen:

En la actualidad, las acciones humanas ocasionan notables modificaciones en el paisaje que producen alteraciones en los sistemas naturales y productivos, así como también en los procesos ecológicos. Una de estas alteraciones se puede evidenciar claramente en la Amazonía ecuatoriana, donde la intensa dinámica de cambios de uso del suelo y cobertura vegetal debido a las tendencias de colonización humana que se inició con las actividades petroleras, ha provocado la desaparición de una gran extensión del bosque primario con la consecuente pérdida de miles de especies de plantas y animales.

Para determinar el comportamiento de estos fenómenos ocurridos en diferentes espacios de tiempo, en este Proyecto de Grado se utilizó una técnica conocida como Autómatas Celulares para realizar el modelamiento espacial de la cobertura vegetal y uso del suelo en el sector comprendido entre La Compañía Agrícola Payamino y la Población Callanayacu ubicado en la Provincia de Orellana, que cubre un área de 6.038,22 hectáreas.

Para ello, en primer lugar, aplicando la técnica de Interpretación Digital se obtuvo la geoinformación necesaria para el análisis de los períodos comprendidos entre 1965 y 2001. Posteriormente sobre esta base se generó dos escenarios prospectivos a los años 2011 y 2020, que indican que para el año 2011 el 91,39% del bosque primario ha desaparecido y para el año 2020 se indica que desaparecerá el 95,49 %, quedando únicamente el 4,51% de la totalidad del área de bosques primarios, con tendencia a desaparecer por completo de continuar con las mismas condiciones actuales.

Palabras clave: Autómatas Celulares/Amazonía/ uso del suelo/cobertura vegetal/ Modelo matemático/Sistema dinámico/Pasos discretos.

Abstract

Currently, human activities cause significant modifications in the landscape producing changes in the natural and the productive systems, as well as ecological processes. One of these changes can be evidenced clearly in the Ecuadorian Amazon, where the intense dynamics of the “Land Use Cover” due to human settlement that began tendency with the fuel oil industry has caused disappearance of the majority of primary forest with consequent loss of thousands of species of plants and animals.

In this Project, we used a methodology to evaluate the effect of these phenomena occurred at different periods of time and through the technique of Cellular Automata we elaborated the spatial modeling of the Land Use Cover in the area between “Compañía Agrícola Payamino and Población Callanayacu” located in Orellana Province, with an extension of 6038.22 hectares.

By the technique of the Interpretación Digital, we analyzed the “Land Use Change Cover” between 1965 and 2001 periods. On this basis, we generated two prospective scenarios for the years 2011 and 2020, indicating that by 2011 the 91.39% of the primary forest has disappeared and by 2020 it will represent only 4.51% of the total area, with a tendency to disappear completely if the current conditions continue.

KEYWORDS: Cellular Automata/ Amazon Jungle/Land Use Cover/Mathematic Model/Dynamic System/ discreet steps.

Oswaldo Padilla (ovpadi@gmail.com); **Pablo Pérez** (pperezs@espe.edu.ec); **Mario Cruz** (mcruz@espe.edu.ec); **Sylvia Huilcamaigua** (ksylvi_22@hotmail.com); **Susana Astudillo** (taty_a123@hotmail.com). Escuela Politécnica del Ejército, Ecuador.

1. INTRODUCCIÓN

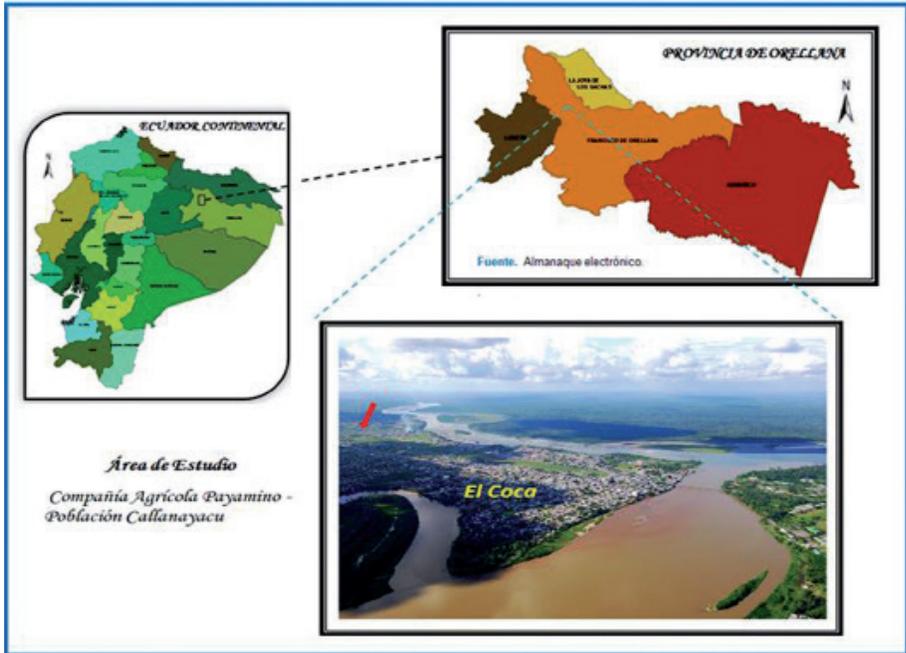
Con el inicio de la actividad petrolera, la Región Amazónica del país cobró interés no solamente desde el punto de vista del recurso mineral, sino por el potencial agrícola de sus tierras. Con la apertura de vías de acceso a las plataformas petroleras y la construcción del Oleoducto Transecuatoriano, se inició una lenta colonización, no planificada, que luego se desarrolló a lo largo de las orillas de los ríos principales, para finalmente, en la actualidad, abarcar una gran extensión del bosque nativo. Como resultado de esta actividad y la rápida expansión de la frontera agrícola, el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo han sido los procesos que más afectación ecológica han causado en esta zona.

Esta intensa dinámica de cambios que se han dado en la cobertura vegetal y uso del suelo, ayudó a encaminar la investigación hacia el diseño de un modelo que facilite entender cómo ocurren estas alteraciones, de tal manera que permita plantear soluciones y la toma de decisiones orientadas a la preservación y conservación de los recursos naturales que todavía subsisten, para ello se consideró la técnica de Autómatas Celulares como una nueva alternativa para estudios prospectivos, a fin de representar los fenómenos con mayor aproximación a la realidad a través de la creación de escenarios tendenciales.

2. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El área de estudio seleccionada para el análisis de este proyecto se encuentra a ocho kilómetros al Noroccidente de la ciudad de Francisco de Orellana (Coca), parroquia Puerto Francisco de Orellana, en un sector delimitado por la Compañía Agrícola Payamino, al Sur, y la población de Callanayacu, al Norte, cubriendo una extensión de 6038,22 ha.

Figura 1. Ubicación geográfica



Fuente: Elaboración propia.

3. MARCO TEÓRICO

El modelamiento espacial es un conjunto de operaciones analíticas y comandos interactivos, que buscan identificar la magnitud y distribución espacial de los cambios, proyectar y representar cartográficamente su probabilidad de ocurrencia en un futuro cercano, suponiendo que las técnicas de manejo de las variables ambientales continuarán siendo similares o tendrán un ritmo de comportamiento semejante al pasado cercano.

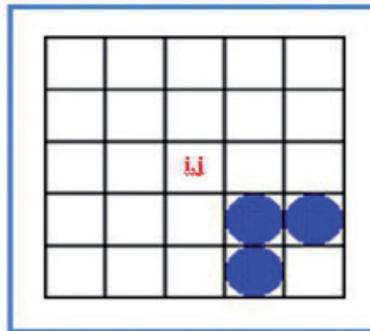
Una de las técnicas de modelamiento espacial, es la de Autómatas Celulares, que se originó en el año de 1940 gracias al investigador John Von Neumann, quien estaba interesado en buscar una teoría general de autómatas para el procesamiento de información que fuera aplicable tanto a sistemas biológicos como a aparatos tecnológicos.

Por lo tanto, el estudio de un **Autómata Celular**, representa un modelo matemático de un sistema dinámico que evoluciona en pasos discretos:

- *Modelo matemático*, porque permite expresar los fenómenos de la vida real en forma matemática, es decir hacer aproximaciones de la realidad física y predicciones para generar escenarios futuros.
- *Sistema dinámico*, porque es un sistema complejo que presenta cambio o evolución de su estado en un tiempo.
- *Pasos discretos*, se dice discreto si el tiempo se mide en pequeños lapsos, entonces denota los pasos discretos del tiempo, es decir que el AC se caracteriza por sus propiedades discretas en el espacio, tiempo y valores de estado.

Como se muestra en la figura 2, el espacio de un AC es un arreglo uniforme de celdas, células o tésales, donde cada una de ellas puede contener algunos bits de información, ocupa la posición (i,j) en el espacio y el tiempo transcurre en pasos discretos, teniendo en cuenta que sus leyes son uniformes y locales.

Figura 2. Espacio de un AC



Fuente:Elaboración propia.

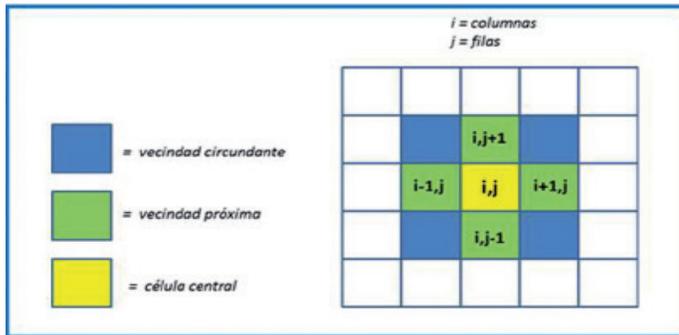
Características de un Autómata Celular

- *Geometría del arreglo de celdas*: Puede tener N dimensiones, los espacios con más de tres dimensiones se construyen fácilmente pero son de difícil interpretación, el AC puede tener bordes cerrados donde tienen valor “0” y bordes perió-

dicos donde los vecinos del borde superior de una celda son el borde inferior de su celda adyacente y los del borde izquierdo son las celdas del borde derecho.

- *Vecindad*: es un conjunto finito de células en las cercanías de la célula central, cada celda es encargada de actualizar su estado recopilando información de ella misma y de un grupo de celdas a su alrededor y la celda central es sobre la cual se realiza los cálculos.

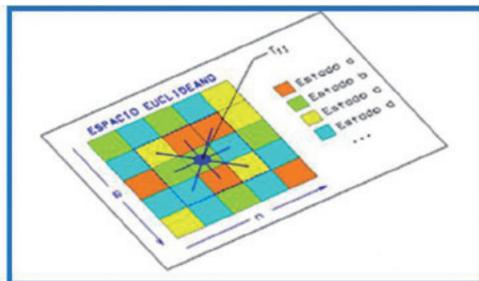
Figura 3. Vecindad de un AC



Fuente: Elaboración propia.

- *Número de estados por celda*: Se puede utilizar cualquier número arbitrario finito de estados y es así como el AC más simple que construyó Von Neumann se autoreplicaba utilizando 29 estados.

Figura 4: Estados de un AC



Fuente: Fuente: Autómatas Celulares, Oswaldo Padilla, pp.2. Septiembre 2005.

- *Reglas que determinan el estado de la celda:* Se basan en la configuración del vecindario, por ejemplo si “k” es el número de estados posibles y “n” el número de celdas en el vecindario, entonces habrán kⁿ posibles reglas de transición del AC, de esta manera el estado de un AC en un tiempo t+1 (E_{p+1}T_{ij}) está en función de su propio estado (E_pT_{ij}) en el tiempo t y de los estados de todos los elementos ubicados en su vecindad pudiendo representarse de la siguiente manera:

$$E_{p+1}T_{ij} = f(E_pT_{ij}, E_pT_{i+1,j}, E_pT_{i-1,j}, E_pT_{i,j+1}, E_pT_{i,j-1}, E_pT_{i+1,j+1}, E_pT_{i+1,j-1}, E_pT_{i-1,j+1}, E_pT_{i-1,j-1})$$

Donde:

T_{ij} = representa el AC o téstal de la posición ij en el espacio

E_p = representa el conjunto [a, b, c, d, ..., n] de estados que puede tomar el AC en el tiempo.

E_{p+1}T_{ij} = representa el estado particular de un AC en función del estado de sus vecinos y de las reglas de transición planteadas.

4. METODOLOGÍA

Un requerimiento para el desarrollo del modelamiento espacial es obtener información cartográfica temática previa de por lo menos dos épocas anteriores diferentes de la que se desea modelar. Para ello se elaboró mapas de cobertura vegetal y uso del suelo para los períodos comprendidos entre 1965 y 2001 usando la técnica de interpretación digital de fotografías aéreas.

Sobre esta base, el modelamiento con Autómatas Celulares consistió en generar dos escenarios prospectivos para los años 2011 y 2020, el primero con el fin de comprobar en campo los resultados del modelo y el segundo con el fin de mostrar la tendencia de desaparición del bosque nativo en favor de la expansión de la frontera agrícola de continuar con las condiciones actuales de uso y sobreexplotación de la tierra.

Se investigó un software adecuado para construir este modelo de simulación de cambio de uso de suelo y cobertura vegetal resolviendo usar DINAMICA EGO, en el cual sus siglas EGO hacen referencia al concepto “Environment for Geoprocessing Objects (Entorno para Objetos de Geo-procesamiento).

DINÁMICA, como un sistema Automata Celular, representa el paisaje como un arreglo regular de celdas n-dimensional que interactúan dentro de cierta vecindad y en donde el estado de cada celda en el arreglo depende de los estados previos de las celdas dentro del vecindario, según una serie de reglas de transición. Todas las celdas se actualizan simultáneamente en pasos de tiempo discretos (Soares - Filho et al. 2002).

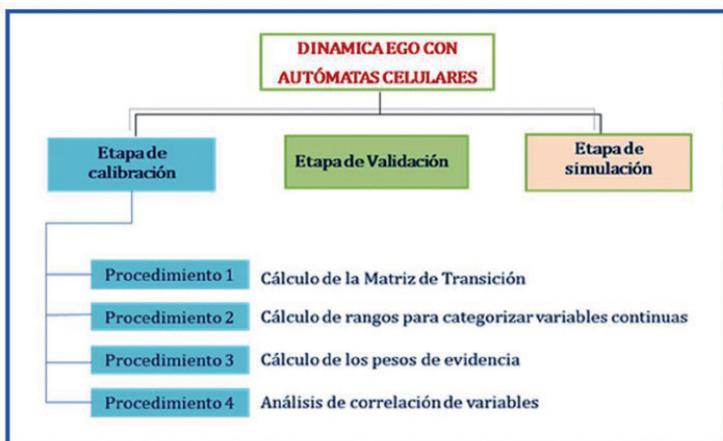
El algoritmo usado para hacer que las celdas interactúen localmente es conocido como regla local del AC, el cual emplea funciones de transición especialmente diseñadas para reproducir las dimensiones y formas del cambio de uso del suelo y cobertura (Almeida et al. 2003) y en este software, estas funciones se denominan: Patcher y Expander.

El modelo de simulación se ejecutó en 3 etapas, generando modelos independientes en cada una de ellas.

Etapa 1: Calibración

En base a criterios socio-ambientales se ingresó 10 variables consideradas como influyentes en el cambio de cobertura vegetal y uso del suelo y fueron clasificadas de la siguiente manera: 4 variables categóricas que poseen datos discretos o cualitativos y 6 variables no categóricas que poseen datos continuos o cuantitativos.

Figura 5- Etapas de ejecución 1 del Software DINÁMICA EGO



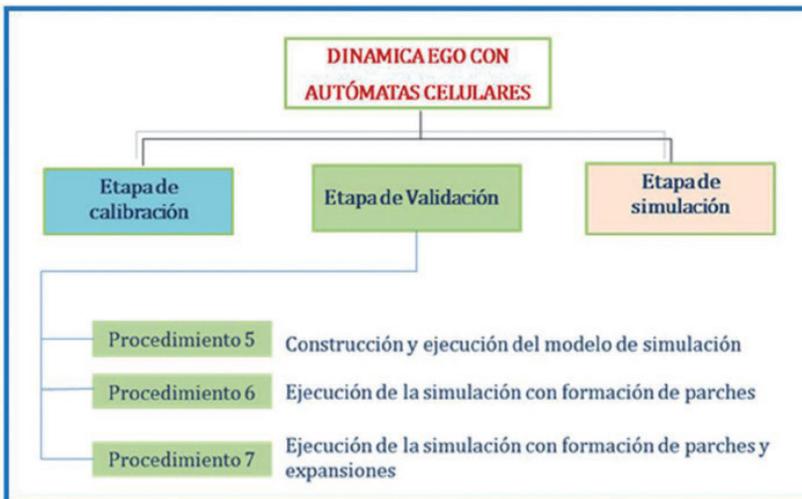
Fuente: Elaboración propia.

Etapa 2: Validación

En el procedimiento 6, se ingresó los valores de los parámetros del Patcher: Tamaño medio del Parche, Tamaño de la varianza e Isometría del Parche, mientras que en el procedimiento 7, además de éstos se ingresó los valores de los porcentajes de cambio para cada una de las coberturas.

El usuario tiene la libertad de modificar cuantas veces sea necesario (pero un solo parámetro a la vez) el valor de los parámetros del Patcher, hasta que se logre conseguir un modelo con un alto grado de semejanza con el mapa de Interpretación digital del 2001.

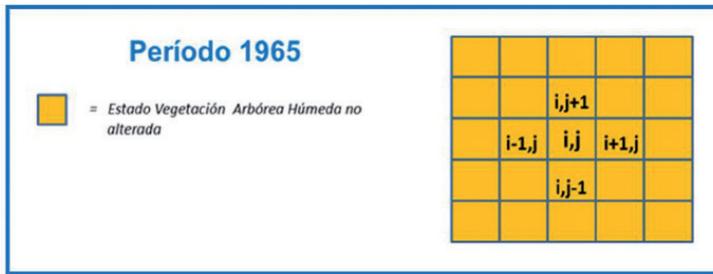
Figura 6. Etapas de ejecución 2 del Software DINÁMICA EGO



Fuente: Elaboración propia.

Cuando se realizó el análisis de la cobertura vegetal y uso del suelo del año 1965 no se presentaron cambios en estos fenómenos por lo tanto todas las células presentaron un solo estado. Figura 7.

Figura 7. Estado del Autómata Celular para el período 1965



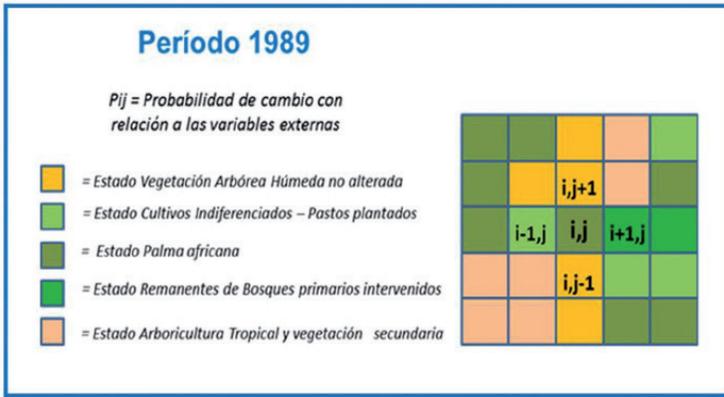
Fuente: Elaboración propia.

A partir del año 1989 aparecieron probabilidades de cambio en la cobertura vegetal y uso del suelo del área de estudio debido a la presencia de vías, plataformas y estaciones petroleras que trajo como consecuencia la colonización no planificada y la deforestación del bosque nativo.

Por lo tanto todas las células sufrieron un cambio en función de sus probabilidades y de un color tomate que presentaban en el año 1965 adquirieron un color distinto para los posteriores años. Figura 8.

- El Patcher es una función de transición diseñada para formar nuevos parches en los mapas a través de la búsqueda y selección inicial de una celda denominada semilla o núcleo para el nuevo parche que crece mediante agregación de celdas vecinas similares en función de sus probabilidades P_{ij} de cambio para luego ejecutar un cambio a la misma clase. Realiza transiciones de un estado i para un estado j cuando las vecindades contiguas de celdas tienen un lugar diferente de j . Opera a partir del sorteo de un número aleatorio entre 0 y 255. Si el número sorteado fuese menor que la probabilidad de transición de la celda (también en un intervalo 0-255), la celda transiciona para el estado j , y viceversa. (CIGA, Capítulo III: "Modelización Proyectiva De Cobertura Y Uso Del Suelo", 66).
- El Expandir es una función de transición diseñada para la expansión o reducción de parches ya existentes de una clase en particular. Realiza transiciones de un estado i para un estado j cuando las vecindades contiguas de celdas tienen estado j , por lo tanto, una nueva " P_{ij} " probabilidad de cambio depende de la cantidad de celdas del tipo j alrededor de una celda tipo i .

Figura 8. Estado del Autómata Celular para el período 1989

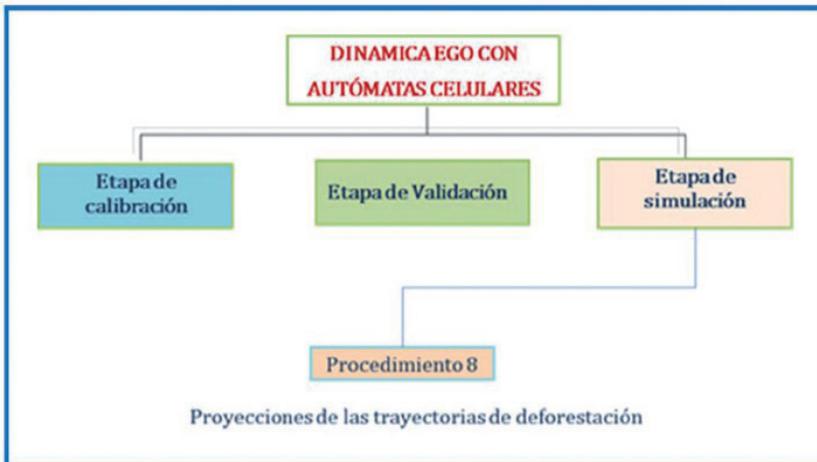


Fuente: Elaboración propia.

Etapa 3: Etapa de Simulación

Una vez determinados los parámetros del Patcher y Expander y obtenido un confiable modelo de simulación para el período 2001, estos mismos parámetros fueron utilizados para realizar los modelos proyectivos para los años 2011 y 2020.

Figura 9. Etapas de ejecución 3 del Software DINÁMICA EGO



Fuente: Elaboración propia.

5. RESULTADOS

Se hizo una comparación entre las dos técnicas (Interpretación Digital Vs. Modelo Autómata Celular para el período 2001) y para ello se empleó la matriz de errores (Tabla 1), con el fin de calcular el porcentaje de error existente entre cada cobertura.

$$error (\%) = \left(\frac{(AC - ID)}{ID} \right) * 100$$

Donde:

AC= Valor del método Autómata Celular

ID= Valor de la interpretación digital

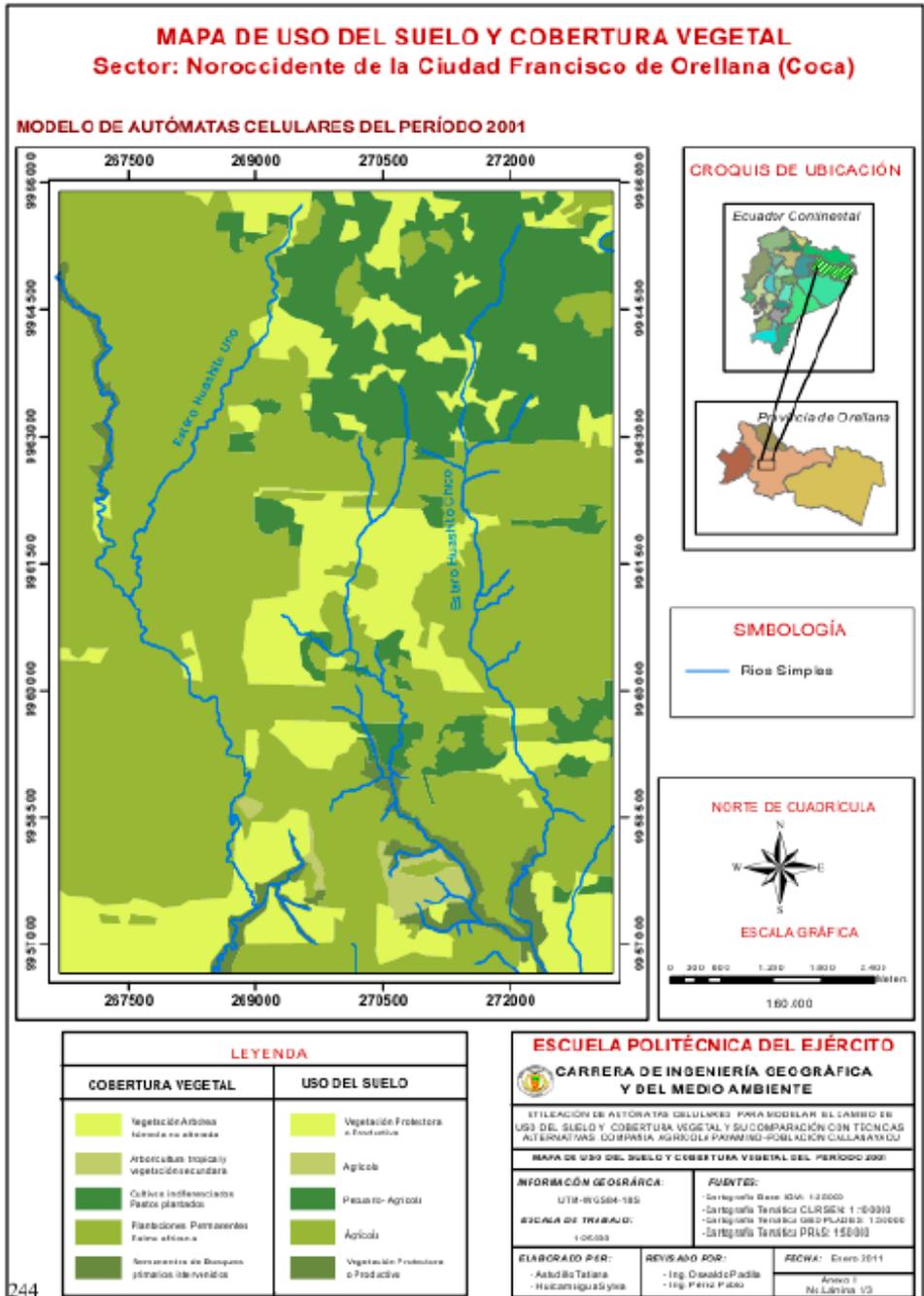
Tabla nº 1: Matriz de errores de las coberturas del año 2001 (Modelo Automata Celular)

<i>Coberturas del Año 2001 (Modelo Automata Celular)</i>	<i>Coberturas del año 2001</i>				
	<i>Vegetación Arbórea húmeda no alterada</i>	<i>Cultivos indiferenciados - pastos plantados</i>	<i>Palma africana</i>	<i>Remanentes de Bosques primarios y secundarios intervenidos</i>	<i>Arboricultura tropical y vegetación secundaria</i>
<i>Vegetación Arbórea húmeda no alterada</i>	4,16	-----	-----	-----	-----
<i>Cultivos indiferenciados - pastos plantados</i>	-----	0,43	-----	-----	-----
<i>Palma africana</i>	-----	-----	1,54	-----	-----
<i>Remanentes de Bosques primarios intervenidos</i>	-----	-----	-----	2,79	-----
<i>Arboricultura tropical y vegetación secundaria</i>	-----	-----	-----	-----	9,29

Fuente: Elaboración propia.

Realizando un promedio de los errores en la matriz: se obtuvo que el modelo Automata Celular a través del uso de DINAMCA EGO, tiene un ajuste del 96,36% de confianza, por lo tanto, la técnica Automata Celular en comparación con la técnica de Interpretación Digital generó un error del 3,64%.

Figura 10. Mapa 1: Modelo de Automatas Celulares del período 2001
Fuente: Elaboración propia



6. CONCLUSIONES

- Para el período 1965 se determinó que el área de estudio estuvo constituida en su totalidad por la categoría denominada Vegetación Arbórea Húmeda no alterada, período en el que la intervención antrópica era nula, mientras que para 1989 y 2001 esta categoría llegó a constituir el 49,98% y 19,40% respectivamente, masa forestal que en éstos años fue desapareciendo aceleradamente, debido al aumento demográfico en la región amazónica.
- Debido a la variedad de software aplicables a modelos espaciales, se consideró a DINAMICA EGO como el aplicativo computacional más adecuado para desarrollar el Modelo de Autómatas Celulares, pues a más de ser un software libre en la web, está especializado en modelar el cambio de Cobertura Vegetal y Uso del Suelo, permitiendo la construcción de diferentes escenarios tendenciales.
- El ajuste del Modelo de Autómatas Celulares para Cobertura Vegetal y Uso del Suelo del período 2001 se determinó en 96,36% de acuerdo a la matriz de errores, y se concluyó que esta técnica es confiable en la medida en que se establezcan los parámetros para las reglas locales del AC: *patcher* y *expander*, utilizadas por DINAMICA EGO.
- El Modelo de Autómatas Celulares indicó que en el período 2011, la categoría denominada Vegetación Arbórea Húmeda no alterada constituye el 8,61% del área total, porcentaje comprobado en campo, al observar que el bosque nativo ha sido sustituido por plantaciones permanentes de palma africana, palmito y teca, cultivos de maíz y malanga y por frutos tropicales como naranjilla, guabas, frutipan y limón mandarina; de continuar con las mismas condiciones actuales, el modelo indicó que para el período 2020 el bosque representará únicamente el 4,51% de la totalidad del área con tendencia a desaparecer por completo.
- En base a criterios socio-ambientales se precisó 4 variables categóricas: Geología, Isotermas, Isoyetas y Uso del suelo, y 6 variables no categóricas: Modelo digital del terreno, Pendientes, Distancia a ríos, Distancia a vías, Distancia a centros poblados y Distancia a plataformas; consideradas como parámetros más influyentes en la alteración del ecosistema natural en el área de estudio.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Almeida Padilla, O. (2005): "Autómatas Celulares una Alternativa para la Geosimulación", en Universidad de Alcalá Henares, España, 10 p.

Publicaciones Internet:

- Almeida, C. M; Batty, M; Vieira, A; Câmara, G; SoaresFilho, B. S; Cerqueira, G. C. y Lopes P. (2003): Stochastic Cellular Automata Modeling of Urban Land Use Dynamics: Empirical Development and Estimation. Computers, Environment and Urban Systems, p. 481-509.
- Britaldo S. SoaresFilho, Hermann O. Rodrigues, William L. (2009): Modelamiento de Dinámica Ambiental con Dinamica EGO. Centro de Sensoriamento Remoto/Universidade Federal de Minas Gerais (CSR/UFMG), Costa, p. 59-90.
- Cuevas, G. (2008): Aplicación de un modelo espacial para la elaboración de escenarios uso/cobertura del suelo en la Huacana, Michoacán, México, p. 17-51.
- Itzhak, B; Torrens. (2004): Geosimulation Automata-based Modeling of Urban Phenomena. Inglaterra.
- Soares, Filho, B. S; Alencar, A; Nepstad, D; Cerqueira, G; Vera-Diaz, M., Rivero, S. L. & Voll, E. (2004): Simulating the Response of Land-Cover Changes to Road Paving and Governance Along a Major Amazon Highway: The Santarém-Cuiabá Corridor. Global Change Biology 10, p. 745-764.