

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y
COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO
PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY**

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

Trabajo de Fin de Carrera Titulado:

**“ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO
DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL
DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO
PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO
CAPUCUY”**

Realizado por:

ING. CAROLINA LISETH CAMPOS SÁNCHEZ

Director del proyecto:

MGS. JOSÉ GABRIEL SALAZAR LOOR

Como requisito para la obtención del título de:

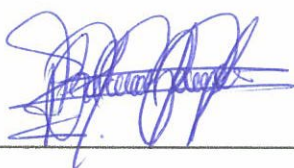
MAGISTER EN GESTIÓN AMBIENTAL

Quito, 09 de agosto de 2018

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA
VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO
EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY**

DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, CAROLINA LISETH CAMPOS SÁNCHEZ, con cédula de identidad # 1722959168, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento. A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.



Carolina Liseth Campos Sánchez

CI.:1722959168

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA
VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO
EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY**

DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:

**“ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA
VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO
PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY”**

Realizado por:

CAROLINA LISETH CAMPOS SÁNCHEZ

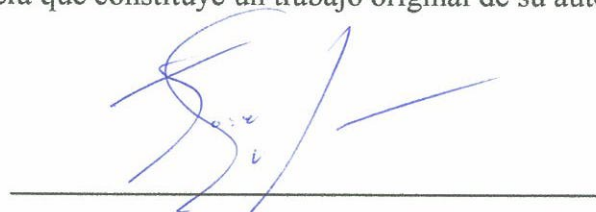
como Requisito para la Obtención del Título de:

MAGISTER EN GESTION AMBIENTAL

ha sido dirigido por el profesor

JOSÉ GABRIEL SALAZAR LOOR

quien considera que constituye un trabajo original de su autor DIRECTOR



José Gabriel Salazar Loor

DIRECTOR

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA
VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO
EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY**

LOS PROFESORES INFORMANTES

JUAN CARLOS NAVARRO

MIGUEL MARTÍNEZ

Después de revisar el trabajo presentado,
lo han calificado como apto para su defensa oral ante
el tribunal examinador



Juan Carlos Navarro



Miguel Martínez

Quito, 09 de agosto de 2018

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

DEDICATORIA

A mi amado esposo Xavier, por ser el motor que impulsa mi vida y la inspiración para seguir adelante conquistando nuevos mundos.

A mi padre Alex, quién llegó a nuestras vidas de una manera inesperada, a revelar ese ser noble y dulce que pocos conocieron, y luego decidió irse dejando un dolor inmenso en mi alma pero a su vez una lección de vida. Donde sea que estés este logro es para tí papito, y esperare paciente hasta que llegue el día de encontrarnos nuevamente y puedas darme un abrazo de felicitaciones.

A mi madre Janeth y hermana Tatiana por impulsarme a ser un mejor ser humano, por su valentía de afrontar la vida a pesar de las adversidades y enseñarme que siempre detrás de las tinieblas el cielo alberga un hermoso arcoíris.

A mis suegros Paco y Marlene, quienes me regalaron al ser más maravilloso de este mundo y siempre están al pendiente de nuestro bienestar.

A mis pequeños Candy, Bamby, Cariño, Princesa, Sofy, Légolas y mi amada Kirita que con su inocencia y dulzura nos llenan de felicidad.

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

AGRADECIMIENTO

A Dios, por todas las cosas buenas y seres maravillosos que ha puesto en mi vida.

A mi esposo Xavier, por ser mi compañero y apoyarme incondicionalmente en todo momento. Gracias amor mío por impulsarme a afrontar este reto y haber sido mi soporte para culminar esta etapa de mi vida.

A los docentes de la Universidad Internacional SEK, por todo el conocimiento impartido durante la maestría.

A mis compañeros Marcelo, María José, Herman, Michelle, Gaby, Andrés, Diana, Gonzalo, Iván, Roberth, Lenín, Andrea y Nataly, con quienes tuve la oportunidad de formar un buen grupo de trabajo y aprender cosas nuevas.

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA
VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO
EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY**

8/8/2018 09:27

Para someter a: Cuadernos de Información Geográfica
To be submitted: Cuadernos de Información Geográfica

**Análisis multitemporal de cambio de uso de suelo y cobertura vegetal para
el desarrollo de un modelo probabilístico prospectivo en la Cuenca del río
Capucuy**

Multitemporal analysis of change in land use and vegetation cover for the
development of a prospective probabilistic model in Capucuy river basin

Carolina Campos Sánchez¹ & José Salazar Loor²

¹Universidad Internacional SEK, Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales, Quito,
Ecuador. 11/7/2018 12:09

²Universidad Internacional SEK, Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales, Quito,
Ecuador.

Autor de correspondencia: Mgs. José Salazar Loor, Universidad Internacional SEK, Facultad
de Ciencias Naturales y Ambientales, Quito, Ecuador.

Teléfono: +593 2 3974800; email: jose.salazar@uisek.edu.ec

Título corto (Running title): Análisis multitemporal de cambio de uso de suelo y cobertura
vegetal

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

Resumen.

La cartografía de los años 1990 al 2016 proporcionada por el Ministerio del Ambiente del Ecuador, muestra que la cobertura vegetal y uso de suelo de la Cuenca del río Capucuy ubicada en la Provincia de Sucumbíos en el cantón Shushufindi, con una superficie aproximada de 14.500 ha, ha sufrido cambios a lo largo de este tiempo debido a las diferentes actividades antrópicas. La zona boscosa de la cuenca ha disminuido de un 87,68 % al 62,81 % del área total, la tierra agropecuaria ha aumentado su área del 10,15 % al 33,92 %. Mientras que la zona antrópica en el año 2000 ocupa un área del 0,20 % y en el 2016 el 1,10 %. En los referente a los cuerpos de agua no habido un cambio significativo. Sin embargo, en la actualidad no existe una metodología que permita determinar los cambios futuros en el uso de suelo y cobertura vegetal de la Cuenca del río Capucuy.

El objetivo de esta investigación fue construir un modelo de simulación de cambio de uso de suelo y cobertura de la Cuenca del río Capucuy en el 2026 mediante el uso de información cartográfica histórica con la ayuda del programa DINÁMICA EGO para cuantificar los posibles efectos antrópicos a futuro.

La validación del modelo mostró que la simulación con los mapas del 2008 y 2016 permite obtener un mapa simulado del 2026 con un error inferior al 5 %, presentando el error más significativo en el área antrópica con un 3,18 %. Se espera que para el 2026 el bosque, el cuerpo de agua, la tierra agropecuaria y la zona antrópica ocupen el 56,83 %, 2,14 %, 40,09 % y 1,34 % del área total de la Cuenca del río Capucuy, respectivamente.

Palabras clave: información cartográfica, simulación, modelo probabilístico, Dinamica EGO

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

Abstract.

The cartography of the years 1990 to 2016 provided by Ministerio del Ambiente of Ecuador, shows that the vegetal coverage and land use of the Capucuy river Basin located in the Province of Sucumbíos in the Shushufindi canton, with an approximate area of 14,500 ha has undergone changes throughout this time due to the different anthropic activities. The forest area of the Basin has decreased in 87.68 % to 62.81 % of the total area, agricultural land has increased its area from 10.15% to 33.92 %. While the anthropic zone in the year 2000 occupies an area of 0.20 % and in 2016 the 1.10 %. In those referring to the bodies of water, there has not been a significant change. However, at present there is no methodology to determine future changes in land use and vegetation cover of the Capucuy river Basin.

The objective of this research was to build a simulation model of land use change and coverage of the Capucuy River Basin in 2026 through the use of historical cartographic information with the help of the DYNAMIC EGO program to quantify possible anthropic effects in the future.

The validation of the model showed that the simulation with the maps of 2008 and 2016 allows us to obtain a simulated map of 2026 with an error of less than 5%, presenting the most significant error in the anthropic area with 3.18%. It is expected that by 2026 the forest, the body of water, the agricultural land and the anthropic zone occupy 56.83 %, 2.14 %, 40.09 % y 1.34 % of the total area of the Capucuy River Basin, respectively.

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

Introducción.

El recurso suelo es reconocido como un elemento imprescindible, que sustenta la formación social, política y económica de la sociedad. El uso de suelo, hace referencia al tipo de utilización de las tierras del sector rural del país. Entre los cuales se encuentran: cultivos permanentes, cultivos transitorios y barbecho, descanso, pastos cultivados, pastos naturales, montes y bosques, páramos y otros usos (INEC, 2017). En los últimos años se han ido generando cambios en la cobertura y uso de suelo debido a la intervención del hombre en el medio natural. No obstante de ser un factor importante en el desarrollo económico tiene un gran impacto en la sostenibilidad global y por ende en la calidad de vida de la población (Corrales, Plata, Hinojoza y Aguilar, 2014).

En términos más amplios el uso de suelo constituye las diferentes formas en que se emplea un terreno y su cubierta vegetal. Es importante señalar que no toda la superficie de un territorio se explota con la misma intensidad ni con los mismos propósitos, ya que hay porciones que se modifican profundamente al utilizarse con fines agropecuarios o como asentamientos humanos y otras que permanecen relativamente inalteradas por las actividades de la humanidad. Sin embargo, es de gran interés conocer las características morfológicas, físicas y químicas del suelo a fin de establecer un uso racional del mismo, en especial a las actividades de explotación agrícola, pecuaria y reforestación (Trucíos, Rivera, Delgado, Estrada & Cerano, 2013).

Galicía, García, Gómez y Ramírez (2018) señalan que es muy común que los términos "cubierta", "cobertura" y "uso del suelo" se encuentren en la literatura como sinónimos. Sin embargo, son términos diferentes, **Cubierta del suelo (en inglés, land cover)** constituye el material o elemento que cubre el suelo y hace referencia a la naturaleza de la superficie del terreno, la cual puede ser identificada visualmente en campo, o a través de medios de percepción remota. Mientras que **Cobertura (en inglés, coverage)** se utiliza especialmente en relación con la vegetación, y se define como el porcentaje del área que cubre en la

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

superficie del suelo la proyección de un tipo de vegetación particular, es decir, la densidad de la cubierta. En cuanto al **uso del suelo (en inglés, land use)** expresa el aprovechamiento o los fines económicos que se les da a las diversas cubiertas. Es importante mencionar que la confusión de estos términos han hecho que en la actualidad se encuentren en forma conjunta “usos y cubiertas de suelo” en inglés LULC (land use – land cover) (Galicia, Romero, Gómez & Ramírez, 2018).

En el siglo XIX el concepto de “cambio de uso del suelo” en inglés *Land use change*, se asocia a las ciencias sociales tales como la geografía humana y la agronomía, considerando que el “uso de suelo” es resultado de la actividad del hombre sobre la cubierta del suelo, por ende se asocia a patrones culturales. El término “cubierta” y el “cambio de uso/cubierta del suelo” (CCUS) (Land use/cover change o LUCC por sus siglas en inglés) aparece con el inicio del uso de la fotografía para prospección e inventario de los recursos naturales. Los sensores multiespectrales transportados a bordo de satélites inician una nueva era en el uso de la percepción remota para el análisis del CCUS, acompañada del desarrollo de los sistemas de información geográfica (Velázquez, Bocoo & Siebe, 2015).

A lo largo de la historia los estudios del CCUS involucran a diferentes disciplinas como la ingeniería, economía regional, ecología y ciencias ambientales. Cabe mencionar que el concepto de CCUS difiere significativamente dependiendo del ámbito disciplinario. Sin embargo, durante las últimas décadas el CCUS se define como el proceso responsable de la pérdida de integridad funcional de los ecosistemas, el factor clave de la pérdida de la biodiversidad y la principal acción humana causante del cambio climático (Velázquez, Bocoo & Siebe, 2015).

El cambio de uso de suelo está influenciado por diversos factores ambientales, demográficos, económicos y socioculturales, los cuales provocan un deterioro ambiental y pérdida de la diversidad biológica (López, Balderas, Chávez, Pérez & Gutierrez, 2015).

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

Según Galicia, García, Gómez y Ramírez (2018), la perspectiva geográfica permite entender las causas y consecuencias de los cambios de cobertura y uso de suelo, los mismos que se asocian a causas directas tales como la transformación de selvas y bosques para la expansión agropecuaria, extracción forestal y de combustible e incremento de infraestructuras y causas subyacentes, las cuales operan en escalas geográficamente amplias y se presentan fuera de la zona de los cambios de cobertura.

Con lo antes expuesto, se tienen los siguientes factores importantes:

- a) Demográficos: incremento de la población y su densidad, y migración.
- b) Económicos: sistema económico, tendencia de los mercados y acceso a los mismos y procesos de urbanización e industrialización.
- c) Cambios técnicos en lo agropecuario y en el manejo forestal.
- d) Corrupción o malos manejos desde el gobierno, desconocimiento de formas políticas de comunidades rurales.
- e) Culturales: usos y costumbres locales, su cosmovisión y el propio comportamiento individual.

Uno de los principales factores que propician el cambio de uso de suelo es el crecimiento descontrolado de la población, la misma que demanda cada vez más recursos de la Tierra. Además, el desarrollo de la ciencia y la tecnología han otorgado a la sociedad humana la capacidad de dominar la estructura y dinámica ambiental. Cabe recalcar que a esto se suma la falta de regulación por parte del estado sobre el uso adecuado de los recursos forestales (Galicia, García, Gómez y Ramírez, 2018).

El estudio de los procesos de cambio de uso de suelo comprende la identificación y análisis de los factores e impactos en los ecosistemas, además de la caracterización y diagnóstico de las cubiertas naturales y artificiales. Estos estudios requieren de uso de metodologías y procedimientos estadístico innovadores, las mismas que se complementan con

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

técnicas de trabajo de campo, sistemas de información geográfica con técnicas de fotointerpretación, cartografía automatizada y análisis de imágenes satélite (López, Balderas, Chávez, Pérez & Gutierrez, 2015; Galicia, García, Gómez & Ramírez, 2018).

Los materiales cartográficos actualmente se pueden obtener de internet, para su posterior uso en un sistema de información geográfica. Estas herramientas permiten identificar y representar las áreas con mayor susceptibilidad al cambio, así como también permiten comprender los procesos y la dinámica de cambio de las diferentes coberturas terrestres y uso de suelo en un determinado territorio. Además, se emplean para desarrollar modelos de cambio de uso de suelo y vegetación sustentados en el diseño y construcción basados en diferentes escenarios hipotéticos (Camacho, Juan, Pineda, Cadena, Bravo & Sánchez, 2015).

En la actualidad, los mapas de uso de suelo y vegetación derivados de la interpretación visual de imágenes satélite son utilizados por los especialistas que estudian los cambios experimentados en los paisajes naturales y antrópicos (culturales). A partir de estas herramientas es posible identificar, describir, cuantificar, localizar, analizar, evaluar, explicar y modelar la dinámica y los procesos de cambio que acontecen en las diversas comunidades vegetales y usos del suelo de un espacio geográfico en particular (Camacho, Juan, Pineda, Cadena, Bravo & Sánchez, 2015).

Los insumos cartográficos se emplean para el diseño y construcción de modelos y escenarios asociados a los cambios de cobertura y uso del suelo, siendo estos la base para el desarrollo de políticas que coadyuvan al cuidado, preservación y restauración los recursos naturales. Sin embargo, el análisis e interpretación de estos materiales genera un cierto grado de incertidumbre, debido a la calidad de los insumos cartográficos, la metodología utilizada para su elaboración y la falta de aplicación de métodos que validaran su fiabilidad. Por ello, las investigaciones en el ámbito del CCUS buscan la mejora de los sistemas de monitoreo, análisis

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

y validación de los procesos de cambio y transiciones (Jhonson & Zuleta, 2013; Camacho, Juan, Pineda, Cadena, Bravo & Sánchez, 2015).

Sandoval y Oyrzum (2004) señalan que la modelación estadística espacial del CCUS tiene como base el uso de técnicas cartográficas, sistemas de información geográfica y modelos estadísticos multivariantes. La simulación de estos procesos de cambio tiene como objetivo responder las siguientes preguntas: ¿por qué ocurre el cambio?, ¿dónde ocurre el cambio? y cuando ocurre el cambio?.

El avance tecnológico ha permitido el desarrollo de diversas herramientas de modelamiento espacial para facilitar el análisis de los CCUS. Estas herramientas se fundamentan en la calibración, validación y en los avances temáticos basados en su utilización (Camacho, Molero & Paegelon, 2014). Según Mertens & Lambin (1997) existen 3 tipos de modelos para explicar el CCUS: los modelos empíricos que imitan las relaciones existentes entre las variables que explican el cambio de uso, asumiendo que estas continuarán de esta misma forma en el futuro, los modelos algorítmicos, en los cuales los procesos individuales de un sistema son descritos por ecuaciones simples bajo principios científicos y los modelos sistémicos enfocados en explicar el funcionamiento de interacción de todos los componentes de un ecosistema.

Los modelos de CCUS se basan en comparaciones de dos o más mapas de cobertura y uso de suelo con fechas diferentes, mediante los cuales se realiza una estimación de los patrones y procesos de cambio (Mas & Sandoval, 2011; Padilla, Pérez, Cruz, Huilcamaigua & Astudillo, 2015). Actualmente, existen una variedad de paquetes de modelación con diferentes enfoques y metodologías que van en función del propósito planteado. Entre estos paquetes se tiene:

CA_MARKOV en IDRISI (Eastman, 2009; Eastman, 2012), CLUE-S (Verburg y Overmars 2009), LAND CHANGE MODELER (LCM), disponible en IDRISI y como extensión en Arc Gis para la versión 10.2 (Eastman, 2012), DINAMICA EGO (Soares-Filho, Cesqueira, & Cássio, 2002; Soares-Filho et al. 2009), entre otros.

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

Dinamica EGO es un software gratuito desarrollado en Brasil, el mismo que permite la identificación de impulsores de cambio, cálculos de tasas de transición y la simulación de futuros escenarios. El término EGO hace referencia al concepto de Environment for Geoprocessing Objects (Entorno para Objetos de Geo-procesamiento). Esta herramienta de modelación permite el diseño de modelos espaciales estáticos hasta complejos modelos dinámicos. Para llevar a cabo la modelación se deben definir las variables y los mapas de cobertura de suelo con diferentes fechas (Espinoza, 2017; Soares-Filho, Rodrigues, & Costa, 2009).

Por otra parte, Dinamica EGO opera sobre una plataforma basada en lenguaje C++ y Java. Este software, como un sistema autómatas celular, representa el paisaje como un arreglo de celdas que interactúan dentro de una vecindad y el estado de cada celda es función de los estados previos de la celda dentro de un mismo vecindario, según una serie de reglas de transición. Todas las celdas se actualizan simultáneamente en pasos de tiempo discretos (Soares-Filho, Cesqueira, & Cássio, 2002; Padilla, Pérez, Cruz, Huilcamaigua & Astudillo, 2015). El algoritmo empleado para hacer que las celdas interactúen localmente se conoce como regla local del AC, el cual emplea funciones de transición para reproducir las dimensiones y formas de cambio de uso de suelo y cobertura, las mismas que se denominan Patcher y Expander (Almeida et al. 2003). Algunas de las ventajas de este programa es que permite transformar variables continuas en categóricas. Además, los pesos de evidencia (indican la influencia de cada una de las variables en la probabilidad espacial de ocurrencia de transición de cobertura y uso de suelo) se calculan de manera independiente para cada variable, esto permite obtener funciones complejas de manera sencilla (Rodrigues, Soares-Filho, Costa, 2007).

Como base de este estudio se tiene la Cuenca del río Capucuy, que se encuentra ubicada en la Provincia de Sucumbíos, en el cantón Shushufindi, su mayor parte se localiza en la parroquia Limoncocha y una pequeña parte en la parroquia Shushufindi, con una superficie

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

aproximada de 14.500 ha. Mediante los mapas de cobertura y uso de la suelo de los años 1990, 2000, 2008 y 2016 proporcionados por el Ministerio del Ambiente del Ecuador (2016) se ha realizado un análisis de los mapas de la Cuenca del río Capucuy, en los cuales se observa que en 1990 se contaba con tres zonas: bosque, cuerpo de agua y tierra agropecuaria. El bosque hace referencia al bosque nativo (ecosistema arbóreo primario o secundario con sus diferentes especies nativas) y la plantación forestal (masa arbórea establecida antrópicamente). El cuerpo de agua puede ser natural o artificial, en el primer caso se refiere a la superficie y volumen asociada al agua estática o en movimiento y en el segundo caso se hace referencia a la superficie y volumen de agua asociada con las actividades antrópicas. La Tierra agropecuaria abarca el pastizal que son vegetaciones herbáceas utilizadas con fines pecuarios y el mosaico agropecuario que son agrupaciones de especies cultivadas mezcladas entre sí. A partir del 2000 aparece la zona antrópica que comprende el área poblada e infraestructura (obra civil de transporte, comunicación, agroindustrial y social) (MAE, 2016).

En los diferentes años mencionados las áreas de las zonas estudiadas han ido cambiando como se observa en la Tabla 1. A partir de estos datos se ha determinado el porcentaje con respecto al total del área de la cuenca de las diferentes zonas en los distintos años analizados, cuyos datos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 1. Áreas de las zonas de la Cuenca del río Capucuy en los años 1990, 2000, 2008 y 2016 (MAE, 2016)

Zona	Año			
	1990	2000	2008	2016
ÁREA BOSQUE (ha)	12712,55	10323,71	10024,32	9107,32
ÁREA CUERPO DE AGUA (ha)	314,78	314,78	314,78	315,46
ÁREA TIERRA AGROPECUARIA (ha)	1472,23	3831,62	4021,78	4917,99
ÁREA ZONA ANTRÓPICA (ha)	0,00	29,44	138,68	158,78
ÁREA CUENCA (ha)	14499,55	14499,55	14499,55	14499,55

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

Tabla 2. Porcentajes de Áreas de las zonas del Río Capucuy en los años 1990, 2000, 2008 y 2016 (MAE, 2016)

Zona	Año			
	1990	2000	2008	2016
ÁREA BOSQUE (%)	87,68	71,20	69,14	62,81
ÁREA CUERPO DE AGUA (%)	2,17	2,17	2,17	2,18
ÁREA TIERRA AGROPECUARIA (%)	10,15	26,43	27,74	33,92
ÁREA ZONA ANTRÓPICA (%)	0,00	0,20	0,96	1,10

Los datos presentados en la Tabla 2 muestran que desde 1990 hasta el 2016 ha disminuido el área del bosque de un 81,68 % del área total de la cuenca a un 62,81%. En el caso de la tierra agropecuaria el área ha aumentado de un 10,15 % a un 33,92 %. En los referente a la zona de cuerpo de agua no habido un cambio significativo con una variación del 0,1 % de 1990 al 2016. Mientras la zona antrópica aparece en el 2000 ocupando un área total de la cuenca del 0,20 % y en el 2016 el 1,10 %.

Es evidente que ha existido un cambio en la cobertura vegetal y el uso de suelo de la Cuenca del río Capucuy y lógicamente se esperaría que sigan existiendo cambios como consecuencia de las actividades antropogénicas. Sin embargo, se requiere conocer de manera acertada cuales serían los cambios que deberían esperarse en un futuro. Para lo cual, se requiere hacer un análisis multitemporal de cambio de uso de suelo y cobertura vegetal para el desarrollo de un modelo probabilístico prospectivo.

Con lo antes expuesto, el objetivo principal de este trabajo es construir un modelo de simulación de cambio de uso de suelo y cobertura de la Cuenca del río Capucuy en el 2026 mediante el uso de información cartográfica histórica con la ayuda del programa DINÁMICA EGO para cuantificar los posibles efectos antrópicos a futuro. Para ello se han establecido como objetivos específicos (1) realizar una evaluación retrospectiva de los cambios de uso de suelo y cobertura de la Cuenca del río Capucuy con base en información cartográfica para establecer los cambios de uso de suelo en los años 1990, 2000, 2008 y 2016, (2) implementar un proceso

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

metodológico mediante el programa DINÁMICA EGO para construir un modelo de simulación de cambio de uso de suelo y cobertura y (3) validar el modelo de simulación de cambio de uso de suelo y cobertura implementado mediante la obtención y comparación de mapas de la Cuenca del río Capucuy de los años 2008, 2016 y 2026, utilizando información cartográfica de los años 1990, 2000, 2008 y 2016 a fin de determinar la confiabilidad del modelo empleado.

La hipótesis de este estudio es que al ser Dinamica EGO un software que permite la simulación de futuros escenarios en función del uso de algoritmos especialmente diseñados para simulaciones espaciales, incluyendo funciones de transición, calibración y validación de métodos, se espera que los parámetros del modelo simulado se ajusten al sistema de cambio de uso de suelo y cobertura de la Cuenca del río Capucuy, obteniéndose un modelo de simulación de la Cuenca del río Capucuy en el 2026 con un error menor al 5%.

Materiales y métodos

Área de estudio

El Área de trabajo para la ejecución de este proyecto es la Cuenca del río Capucuy, que se encuentra ubicada en la Provincia de Sucumbíos, en el cantón Shushufindi, su mayor parte se localiza en la parroquia Limoncocha y una pequeña parte en la parroquia Shushufindi, con una superficie aproximada de 14.500 ha.

Evaluación retrospectiva de los cambios de uso de suelo y cobertura de la Cuenca del río Capucuy

Para la evaluación retrospectiva de los cambios de uso de suelo y cobertura de la Cuenca del río Capucuy se trabajó con los mapas de cobertura y uso de suelo del Ecuador de los años 1990, 2000, 2008 y 2016, descargados de la página web del Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE) del siguiente link <http://mapainteractivo.ambiente.gob.ec/portal/>. Con ayuda del Programa ARCGIS 10.2.1 se realizó los cortes de los mapas descargados, a fin de obtener los mapas de uso de suelo y cobertura de la Cuenca del río Capucuy de los años 1990,

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

2000, 2008 y 2016. Posteriormente, se definió la leyenda de trabajo (zonas de los mapas) y el área de las mismas.

Con los datos obtenidos de cada uno de los mapas se determinó los cambios más representativos en las áreas de las zonas de la Cuenca del río Capucuy desde 1990 hasta el 2016.

Construcción del modelo de simulación de cambio de uso de suelo y cobertura

La construcción del modelo de simulación de cambio de uso de suelo y cobertura se realizó con base en los mapas de uso de suelo y cobertura de la Cuenca del río Capucuy de los años 1990, 2000, 2008 y 2016 e información cartográfica de mapas de altitud de vías, senderos, roderas, población, pozos petroleros y áreas protegidas de la cuenca, las cuales actúan como variables (posibles impulsores de cambio). El modelo obtenido mediante el software Dinámica EGO se expresa mediante functores que forman un diagrama de flujo.

La información cartográfica empleada fue homologada, es decir, cada mapa plasmado en un ráster cuenta con el mismo número de filas, columnas, píxeles y sistemas de proyección, para lo cual se empleó el programa ARCGIS 10.2.1. Los mapas empleados tienen un tamaño de celda de 81,44 m, se encuentran en coordenadas WGS_1984_UTM_ 18 S y están en formatos GeoTiff.

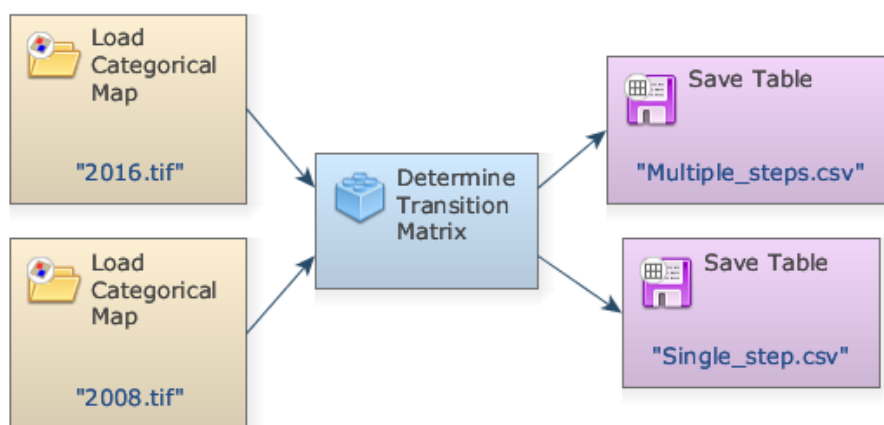
Dinámica EGO usa una clasificación numérica para la identificación de las diferentes zonas de los mapas. La identificación empleada fue: (1) Bosque; (2) Cuerpo de agua; (3) Tierra agropecuaria y (4) Zona antrópica Tierra. En el caso de las variables se trabajó con un cubo ráster o “cubo de mapas”. El mismo que contiene una variable categórica: mapa de áreas protegidas y cinco variables no categóricas: mapas de distancia a centros poblados, distancia a vías, distancia a senderos, distancia a roderas, distancia a pozos petroleros, cuyos mapas se presentan en el Anexo A, los cuales consideran mapas estáticos porque no cambian a lo largo de las iteraciones del modelo y se presentan en el ANEXO A. A continuación se explican los pasos a seguir para la construcción del modelo de simulación.

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

Paso 1: Calcular matrices de transición

La matriz de transición describe los cambios de un sistema a través de periodos discretos de tiempo, en los cuales, el valor de cualquier variable (Ejm: hectáreas de bosque) en un periodo dado, es la suma de los porcentajes fijos del valor de las variables en el periodo de tiempo previo. Las tasas de transición determinan la cantidad neta de cambios, es decir, el porcentaje de área que será cambiado a otro estado (a un tipo de uso del suelo o cobertura diferente al original). Por lo tanto, son tasas adimensionales. En la Figura 1 se muestra el modelo empleado para calcular la matriz de transición. En el Functor Load Categorical Map se cargan los mapas inicial y final. Este modelo calcula las matrices single-step de un sólo paso que representa las tasas de transición para un único intervalo de tiempo (intervalo total) entre el estado inicial y final de un paisaje. Además, calcula la matriz de múltiples pasos (multiple-step matrix) que representa las tasas de transición para cada período de tiempo (año, mes, día, etc.) especificado al dividir el intervalo de tiempo total por el número de pasos que se desea analizar.

Figura 1. Modelo para el cálculo de matrices de transición



Paso 2: Calcular rangos para categorizar variables continuas

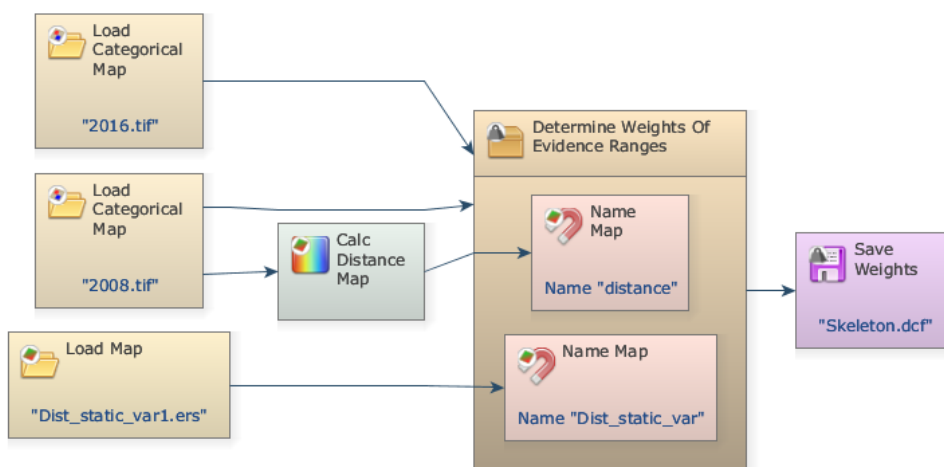
Este modelo calcula los rangos para categorizar las variables continuas y obtener de esta forma los pesos de evidencia, los cuales representan la influencia de cada una de las

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

variables en la probabilidad espacial de ocurrencia de una transición. El modelo selecciona el número de intervalos y el tamaño de sus buffers buscando conservar la estructura original de los datos de la variable continua. El modelo aplicado para calcular rangos para categorizar variables continuas se indica en la Figura 2, en el cual se emplea los functors Categorical Map para cargar los mapas inicial y final y un functor Load Map el cual recibe un cubo raster compuesto por una serie de mapas estáticos (mapas de distancia a centros poblados, distancia a vías, distancia a senderos, distancia a roderas, distancia a pozos petroleros y zonas protegidas de la cuenca, cuyos mapas se presentan en el Anexo A). Además, para este modelo se incluyó la variable “distance” como una cobertura dinámica. Para este propósito, el modelo emplea el functor Calc Distance Map. El functor genera un mapa de distancias (la distancia más cercana) a las celdas pertenecientes a cada categoría de la clase del mapa definida por el usuario.

Se utilizó el functor Save weights para obtener la estructura de los pesos de evidencia, en el cual se definen los rangos de pesos en cada una de las transiciones. El resultado de este functor fue el archivo del almacén de los pesos de evidencia (Weights of Evidence skeleton), que muestra los rangos de categorización, pero con todos los pesos iguales a cero todavía.

Figura 2. Modelo para el cálculo de rangos para categorizar variables continuas

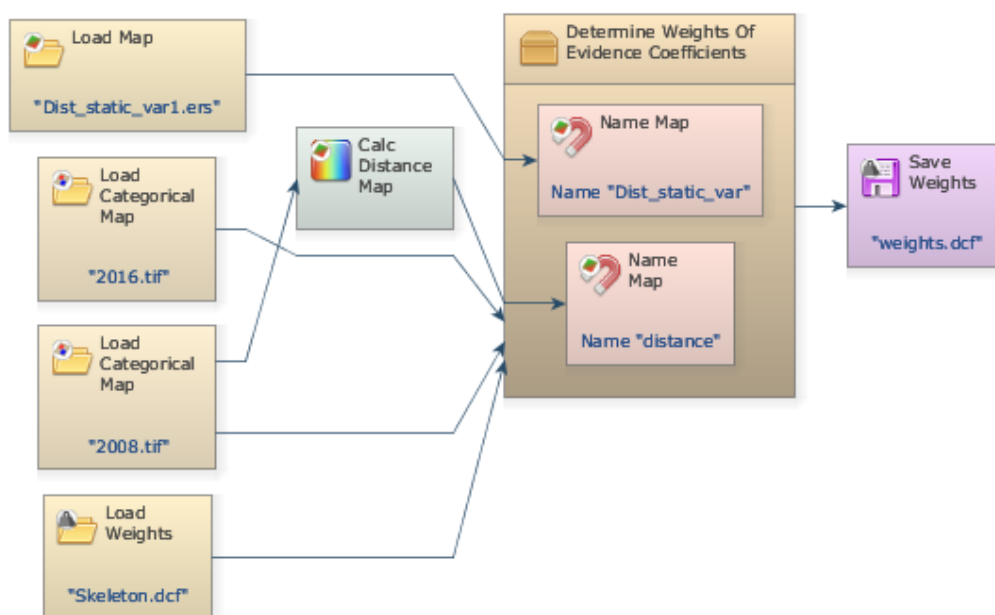


ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

Paso 3: Calcular pesos de evidencia

Para este paso se trabajó con el functor Determinate Weight of evidence Coefficients, se usó el mismo grupo de datos que el paso anterior, más el WEOF skeleton. No hay ningún parámetro que definir en el functor Determine Weights Of Evidence Coefficients, sólo definió las conexiones a ejecutarse como se indica en la Figura 3. Este paso permite determinar rangos; el número de celdas de cada buffer, el número de transiciones que ocurrieron dentro de cada buffer; los coeficientes obtenidos; el contraste; el resultado del test de significancia estadística.

Figura 3. Modelo para el cálculo de pesos de evidencia



Como se indicó en el paso 2, Dinámica EGO trabaja con el método geoestadístico de los pesos de evidencia, los cuales determinan la influencia de cada una de las variables en la probabilidad espacial de ocurrencia de una transición de cobertura y uso de suelo. De acuerdo a este análisis las variables que obtengan valores negativos o iguales a 0 no tienen ningún peso en la transición. Mientras que las variables con valores mayores a 0 sí influyen en la transición de una cobertura a otra. Al ejecutar este paso se obtendrán gráficos de líneas de tendencia que arroja el programa para las diferentes transiciones: el eje X está definido por la distancia en

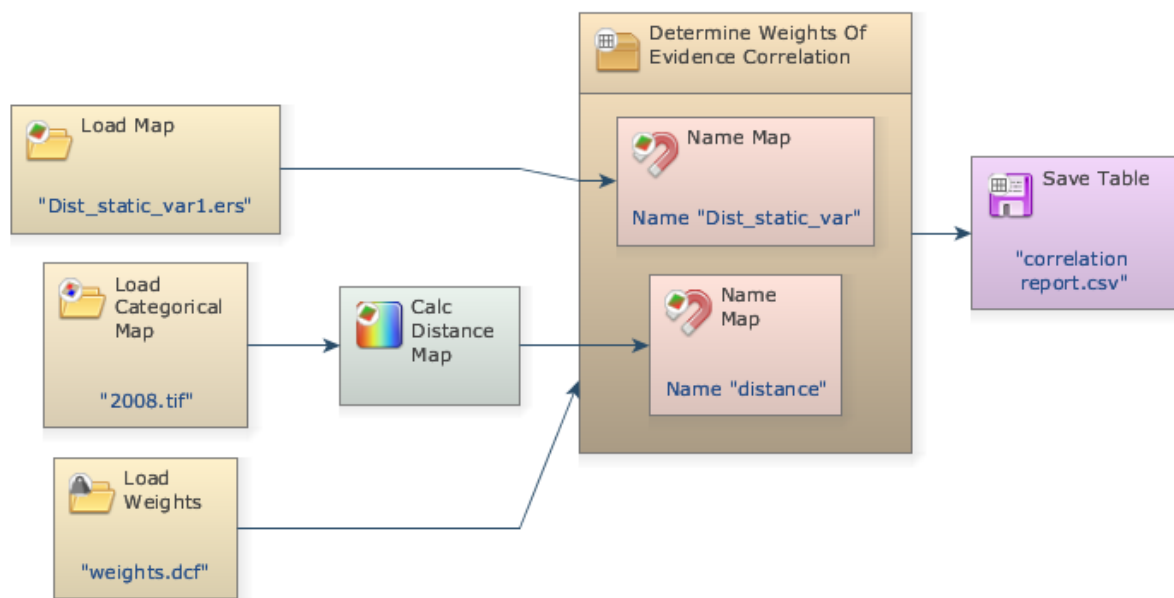
ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

metros a una determinada variable, mientras que el eje Y está referido al peso o valor que posee dicha variable en la transición. En el anexo B se presentan gráficos de líneas de tendencia.

Paso 4: Correlación entre mapas

El único supuesto del método de pesos de evidencia es que los mapas a ser utilizados como insumos son espacialmente independientes. Para ello, Dinámica EGO incluye en el modelo el índice de Cramer, el cual opera en valores reales entre 0 y 1. Mientras las variables comparadas se encuentren más cercanas a 1 poseen mayor correlación y son menos independientes, por lo que una de ellas debe ser eliminada del proceso. Para realizar esto se trabajó con el functor Determine Weights of Evidence Correlations, como se indica en la Figura 4.

Figura 4. Modelo para analizar la correlación entre mapas



Este modelo realiza pruebas pareadas para mapas categóricos con el fin de comprobar el supuesto de independencia. Los datos generados de este modelo se analizan en un archivo Excel a fin de determinar si es apropiado o no excluir una variable que presente una desviación grande con respecto a los demás valores.

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

Paso 5: Construir y ejecutar el modelo de simulación LUCC

Para la construcción y ejecución del modelo de simulación LUCC se empleó el modelo indicado en la Figura 5. Este paso permite simular un mapa ya existente denominado “mapa real observado” a fin de compararlo con el mapa simulado. Dinámica EGO emplea Modelos de autómatas celulares denominados patcher y expander, que son sistemas espaciales dinámicos capaces de demostrar comportamientos complejos, en los que el estado de cada celda (o píxel) depende del estado de las celdas vecinas. El patcher está diseñado para formar nuevos parches de una cobertura de suelo a través de un mecanismo semilla, mientras que el expander se dedica a expandir o contraer una clase de cobertura de suelo ya existente.

Al variar los parámetros patcher y expander, se permite la formación de parches con distintos tamaños y formas. El PatchIsometry varía de 0 a 2. Los parches asumen una forma más isométrica (circular) cuanto mayor es este número. Los tamaños de los nuevos parches son determinados de acuerdo a una probabilidad de distribución log-normal. Por lo tanto, fue necesario indicar los parámetros de esta función, representados por la media y varianza del tamaño de los parches a ser formados. Al definir los parámetros de Mean Patch (media) y Patch Size Variance (varianza) como “1” no se permitirá la formación de nuevos parches.

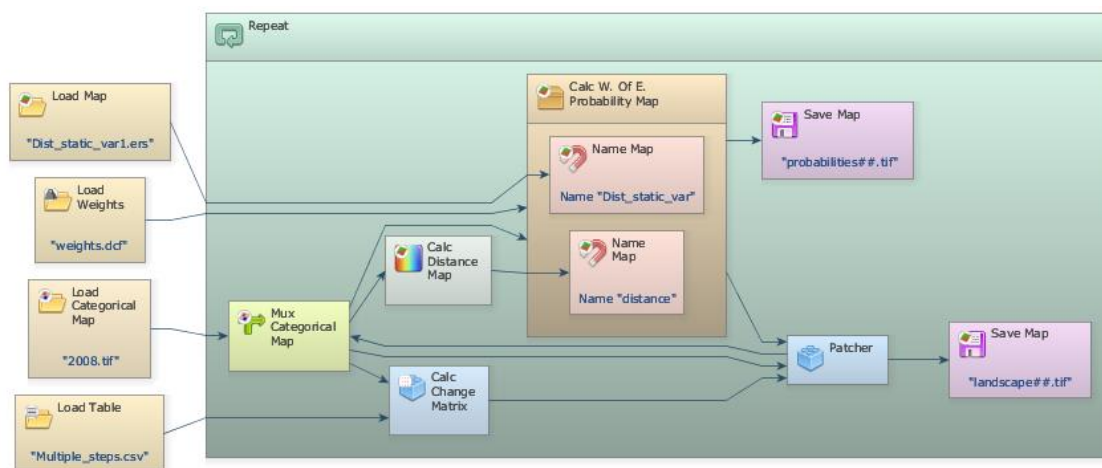
En este modelo se empleó un Load Map para el cubo raster: Load Weights para el archivo con los pesos de evidencia: “weights.dcf”; y Load Table para la matriz de transición multi-step: “multiple_steps.csv”. Adicionalmente, se trabajó con un Repeat, y se colocó en su interior los siguientes functors: Calc Distance Map, Mux Categorical Map, Calc Weights of Evidence Probability Map y Save Map. También se colocó dos Name Map dentro del Calc Weights of Evidence Probability Map.

Por otra parte, se colocó dos functors adicionales, Patcher de la pestaña Simulation, y otro Save Map. Se conectó el puerto de salida del Mux Categorical Map con el puerto Landscape del Patcher, el producto de Calc W. Of E. Probability Map con el puerto Probabilities

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

del Patcher, y el output de Calc Change Matrix con el puerto Changes del Patcher. Para cerrar el loop se conectó el puerto de salida Changed Landscape del Patcher con el puerto Feedback del Mux Categorical Map y con el Map “Landscape##.tif” para guardar los mapas que se producirán en cada iteración del modelo.

Figura 5. Modelo para la construcción y ejecución del modelo de simulación LUCC



El functor Mux Categorical Map permite actualizar dinámicamente el mapa del paisaje utilizado como insumo. Al inicio de la simulación, recibe al Categorical Map del año inicial en su puerto Initial y de allí en adelante, recibirá en su puerto Feedback cada uno de los paisajes producidos en cada iteración(desde el Patcher). El functor Calc W. OF. E. Probability Map calcula un mapa de probabilidades de transición para cada una de las transiciones especificadas anteriormente. A su vez, el Calc Change Matrix recibe la matriz de transición, compuesta por tasas netas, y la usa para calcular tasas brutas, en términos de la cantidad de celdas que cambiarán al multiplicar las tasas de transición por el número de celdas disponibles para un cambio específico.

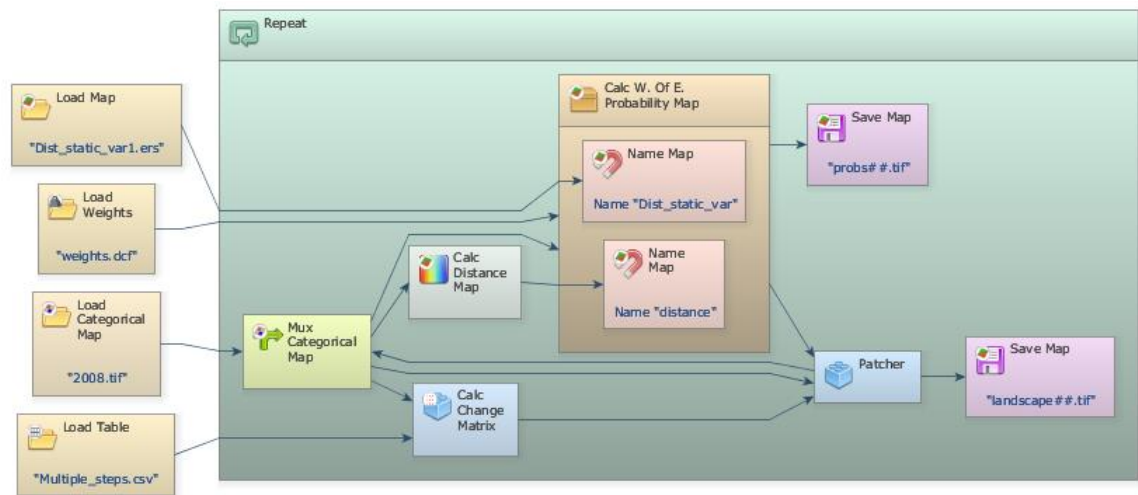
Paso 6: Ejecutar la simulación con formación de parches

Este paso busca analizar el efecto de los parámetros de la función de transición patcher en la estructura de un paisaje simulado, para lo cual se realizó el modelo del quinto paso como se indica en la Figura 6. En esta ocasión el tamaño del patcher se establece en 2,65 ha, la

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

variación del tamaño del parche en 5,31 ha y la isometría del parche en 1.5. Dado que el tamaño de celda es igual a 0,66 hectáreas (81,44 m x 81,44 m), los parches que se formarán tendrán en promedio 4 celdas y una variación de 8 celdas.

Figura 6. Modelo para ejecutar la simulación con formación de parches



En este paso se recomienda ejecutar el modelo obtenido en el quinto paso y realizar una comparación visual con el modelo obtenido en este paso.

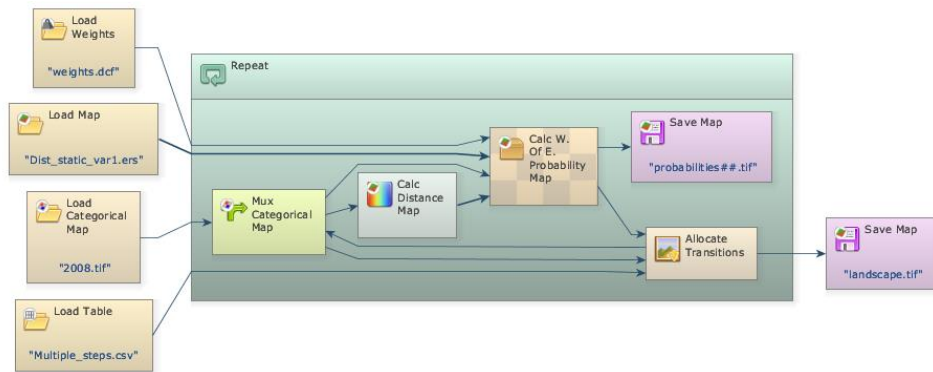
Paso 7: Ejecutar la simulación con formación de parches y expansiones

El functor Expander está dedicado solo a la expansión o contracción de parches previos de una cierta clase. Para la ejecución de la simulación con formación de parches y expansiones se utilizó el modelo presentado en la Figura 7. En el cual el Submodelo Allocate Transitions realiza la asignación de transición en un mapa de paisaje usando el Expander y el Patcher según una matriz de transición que especifica las tasas netas, un mapa de probabilidad y otros parámetros que definen la geometría del parche. Se ejecutó el modelo, y se comparó su resultado con los anteriores.

Nota: Es posible variar los valores del expander y el parche hasta conseguir el modelo que más se ajuste al mapa real. Sin embargo, se debe variar una sola variable vez e ir probando su influencia en el mapa obtenido.

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

Figura 7. Modelo para la ejecución de la simulación con formación de parches y expansiones

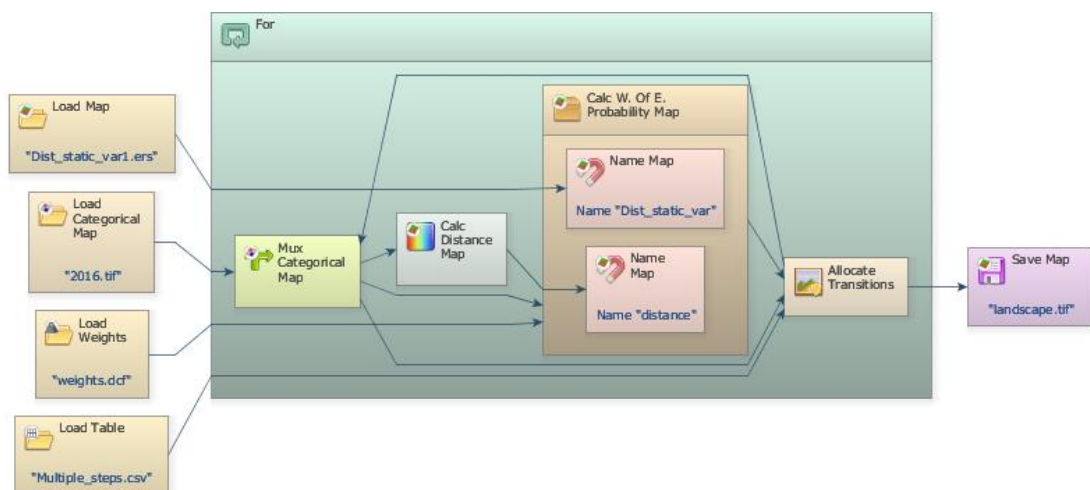


Paso 8: Proyección de mapas simulados de uso de suelo y cobertura de la Cuenca del río Capucuy de años futuros

Para la proyección del mapa simulado de uso de suelo y cobertura de la Cuenca del río Capucuy se realizó el modelo indicado en la Figura 8. Las únicas diferencias entre este modelo y el anterior consisten en el paisaje inicial, que ahora es el mapa 2016. Como este modelo usa tasas de transición fijas, se puede considerar que proyecta la tendencia histórica en el futuro, por lo que se denomina escenario de tendencia histórica.

En este paso es posible iterar a cualquier año, para la finalidad de este trabajo se evaluó el modelo obtenido en el 2016 y se comparó con el mapa del 2016 real. Además se analizó el modelo obtenido en el 2026.

Figura 8. Modelo para la proyección del mapa simulado de uso de suelo y cobertura



ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

Validación del modelo de simulación de cambio de uso de suelo y cobertura implementado

El modelo de simulación de cambio de uso de suelo y cobertura desarrollado mediante el programa DINÁMICA EGO requiere de un mapa inicial (Ejm: año 2008) y un mapa final (Ejm: año 2016). Con la finalidad de evaluar la confiabilidad del modelo desarrollado se emplearon los mapas de cambio de uso de suelo y cobertura de los años 1990, 2000, 2008 y 2016 realizando las siguientes las combinaciones y comparaciones indicadas en la Tabla 3.

Tabla 3. Comparación de los mapas obtenidos mediante el modelo de simulación de cambio de uso de suelo y cobertura desarrollados en el programa DINÁMICA EGO

Mapa inicial	Mapa final	Simulación	Comparación
1990	2000	2008	Mapa 2008 proporcionado por el MAE
2000	2008	2016	Mapa 2016 proporcionado por el MAE
2008	2016	2026	Se compararán los dos mapas obtenidos en el 2026 mediante la simulación en el programa DINAMICA EGO.
1990	2000	2026	

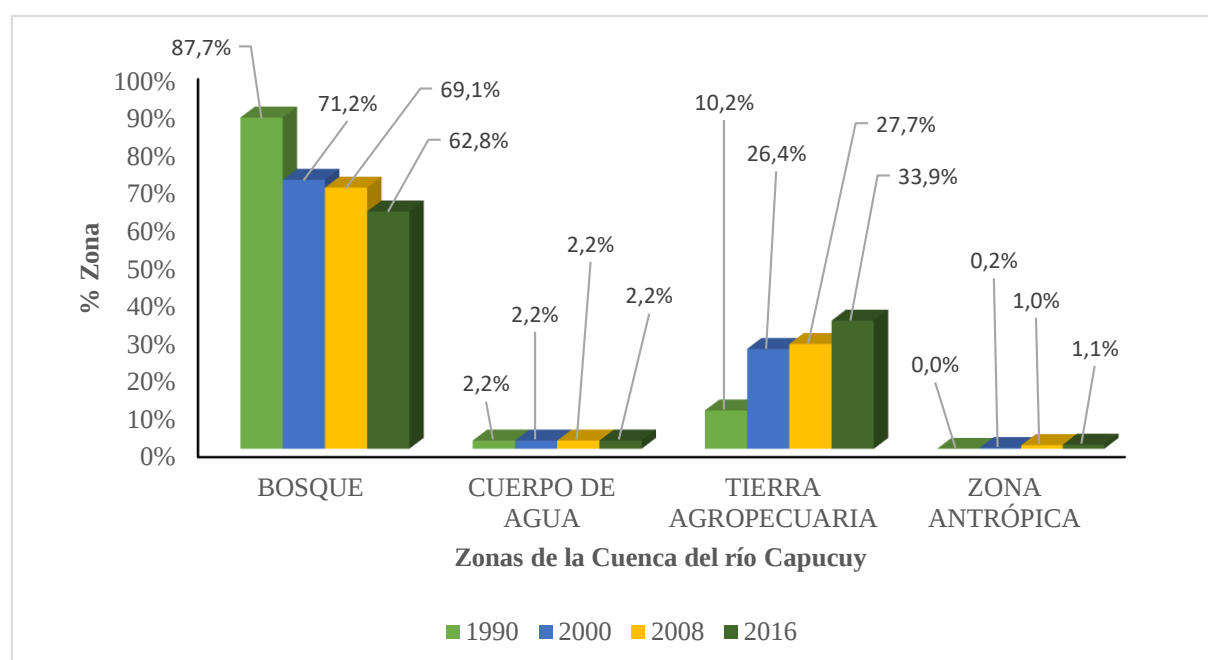
Los mapas obtenidos fueron procesados en el software ARCGIS 10.2.1 a fin de determinar las áreas de las zonas de los mapas simulados y compararlas con las áreas de los mapas reales.

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

Resultados.

Con base en la información cartográfica proporcionada por el MAE (2016) se presenta en la Figura 9 los porcentajes que ocupan las diferentes zonas de la Cuenca del río Capucuy con respecto al área total de la cuenca en los años 1990, 2000, 2008 y 2016.

Figura 9. Porcentajes que ocupan las diferentes zonas de la Cuenca del río Capucuy en los años 1990, 2000, 2008 y 2016



El desarrollo del modelo de simulación de cambio de uso de suelo y cobertura vegetal requiere trabajar con dos mapas (inicial y final), en este estudio se trabajó con los mapas de cobertura y uso de suelo de 1990 – 2000, 2000-2008 y 2008-2016 proporcionados por el MAE. Como se muestra en la Figura 1 el primer paso de la simulación en el programa Dinámica EGO es calcular las matrices de transición que determinan la cantidad neta de cambios, es decir, el porcentaje de área que será cambiado a otro estado (a un tipo de uso del suelo o cobertura diferente al original).

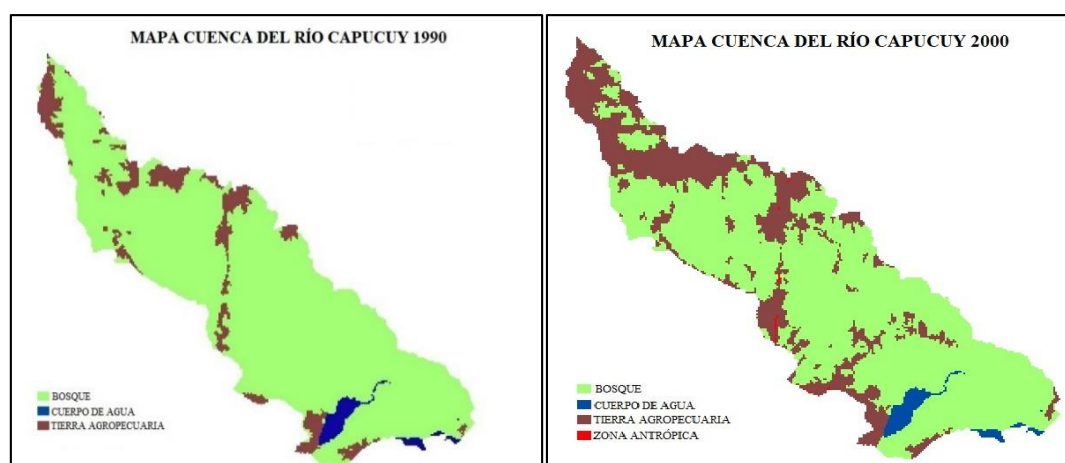
ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

Tabla 4. Transiciones de las simulaciones con los mapas de cobertura y uso de suelo de: 1990 – 2000, 2000 – 2008 y 2008 – 2016

Mapas	Transiciones		Transición (%)
	De	A	
1990 - 2000	Bosque	Tierra agropecuaria	19,627
	Bosque	Zona antrópica	0,047
	Tierra agropecuaria	Bosque	8,168
	Tierra agropecuaria	Zona antrópica	1,309
2000 - 2008	Bosque	Tierra agropecuaria	0,659
	Bosque	Zona antrópica	0,004
	Tierra agropecuaria	Bosque	0,736
	Tierra agropecuaria	Zona antrópica	0,346
2008 - 2016	Bosque	Tierra agropecuaria	1,753
	Tierra agropecuaria	Bosque	1,193
	Tierra agropecuaria	Cuerpo de agua	0,002
	Tierra agropecuaria	Zona antrópica	0,065

En la Figura 10 se muestra una comparación entre los mapas de cobertura y uso de suelo de 1990 y el 2000 (MAE, 2016). Mientras que en la Figura 11, Figura 12 y Figura 13 se presenta una comparación entre los mapas simulados (2000, 2008 y 2016, obtenidos a partir de los mapas 1990 - 2000) y los reales. En la Tabla 5, Tabla 6 y Tabla 7, se muestran los porcentajes de error la comparar las áreas de las zonas de los mapas simulados con los reales de los años mencionados.

Figura 10. Mapas de cobertura y uso de suelo de la Cuenca del río Capucuy de los años 1990 y 2000 (MAE, 2016)



ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

Figura 11. Mapas de cobertura y uso de suelo de la Cuenca del río Capucuy del año 2000 real y simulado (obtenido a partir de los mapas de 1990 y 2000)

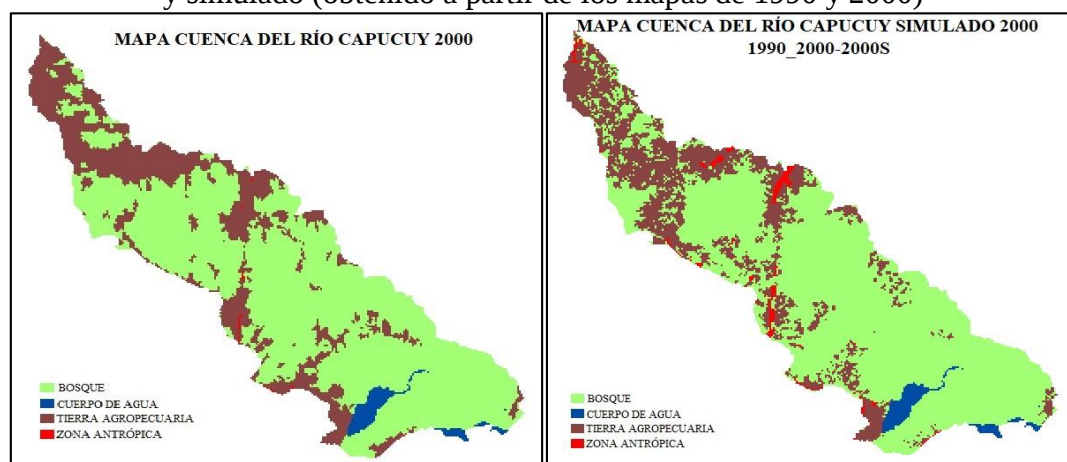


Tabla 5. Porcentajes de error del mapa simulado de cobertura y uso de suelo del 2000 a partir de los mapas de 1990 y 2000

Zona	1990	2000	2000 Simulado	% Error
Área bosque (ha)	12712,55	10323,71	8240,19	0,32
Área cuerpo de agua (ha)	314,78	314,78	309,74	1,81
Área tierra agropecuaria (ha)	1472,23	3831,62	5812,70	4,00
Área zona antrópica (ha)	0,00	29,44	194,99	625,35
Área cuenca (ha)	14499,55	14499,55	14557,62	0,40

Figura 12. Mapas de cobertura y uso de suelo de la Cuenca del río Capucuy del año 2008 real y simulado (obtenido a partir de los mapas de 1990 y 2000)

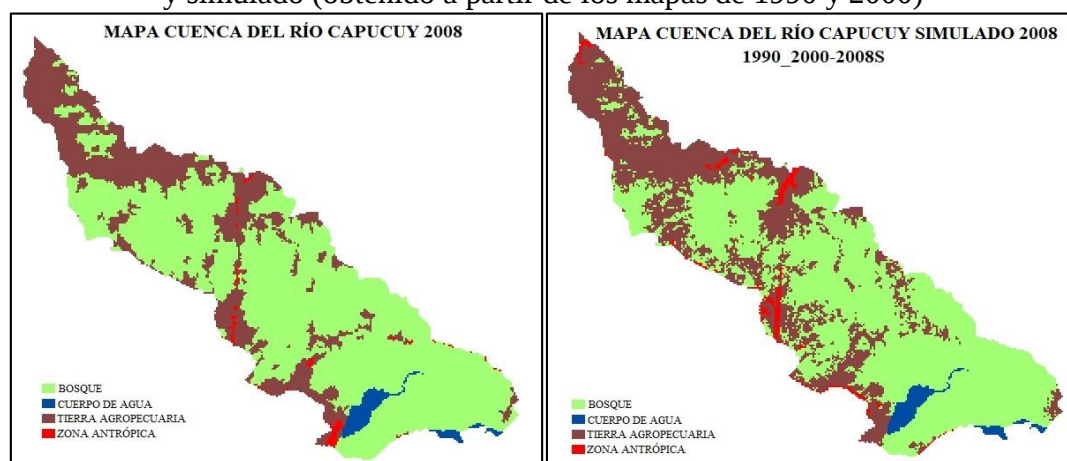


Tabla 6. Porcentajes de error del mapa de cobertura y uso de suelo simulado del 2008 a partir de los mapas de 1990 y 2000

Zona	1990	2000	2008	2008 Simulado	% Error
Área bosque (ha)	12712,55	10323,71	10024,32	9725,20	2,98
Área cuerpo de agua (ha)	314,78	314,78	314,78	309,07	1,81
Área tierra agropecuaria (ha)	1472,23	3831,62	4021,78	4203,66	4,52
Área zona antrópica (ha)	0,00	29,44	138,68	319,69	130,53
Área cuenca (ha)	14499,55	14499,55	14499,55	14557,62	0,40

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

Figura 13. Mapas de cobertura y uso de suelo de la Cuenca del río Capucuy del año 2016 real y simulado (obtenido a partir de los mapas de 1990 y 2000)

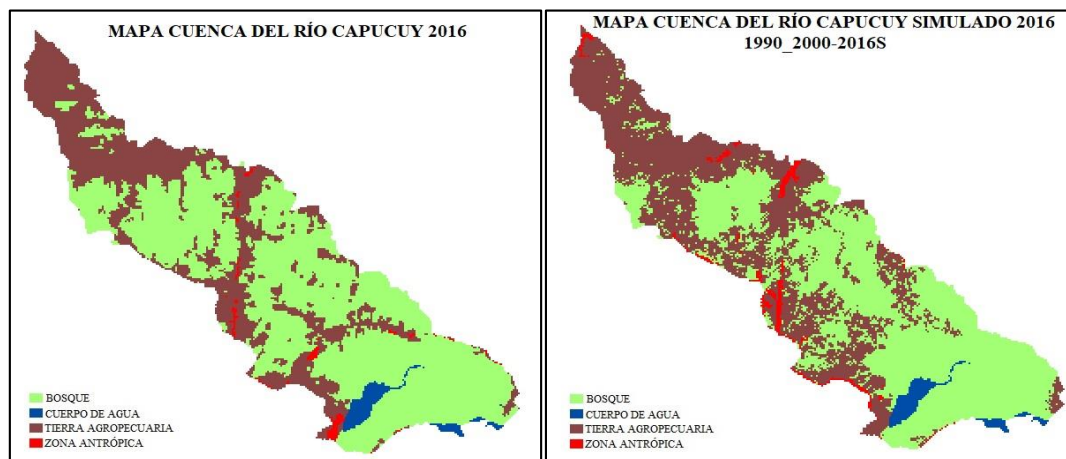


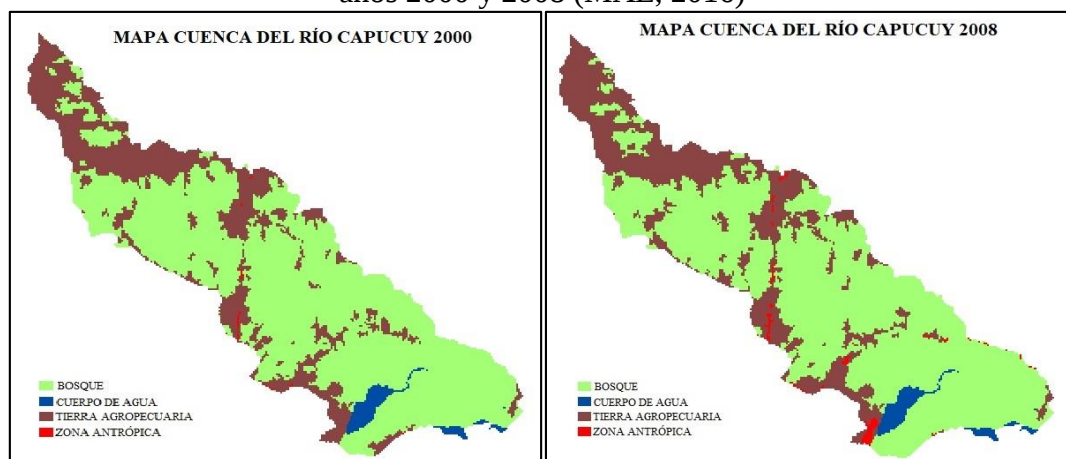
Tabla 7. Porcentajes de error del mapa de cobertura y uso de suelo simulado del 2016 a partir de los mapas de 1990 y 2000

Zona	1990	2000	2016	2016 Simulado	% Error
Área bosque (ha)	12712,55	10323,71	9107,32	9140,21	0,36
Área cuerpo de agua (ha)	314,78	314,78	315,46	309,07	2,02
Área tierra agropecuaria (ha)	1472,23	3831,62	4917,99	4764,77	3,12
Área zona antrópica (ha)	0,00	29,44	158,78	343,56	116,38
Área cuenca (ha)	14499,55	14499,55	14499,55	14557,62	0,40

Debido a que los porcentajes de error de los mapas simulados de cobertura y uso de suelo (2000, 2008 y 2016) obtenidos a partir de los mapas de 1990 y 2000 es mayor al 5 %, no se realiza la simulación del año 2026 ya que el modelo obtenido no es confiable.

En la Figura 14 se muestra una comparación entre los mapas de cobertura y uso de suelo 2000 y el 2008 (MAE, 2016).

Figura 14. Mapas de cobertura y uso de suelo de la Cuenca del río Capucuy de los años 2000 y 2008 (MAE, 2016)



ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

En la Figura 15 y Figura 16 se presenta una comparación entre los mapas simulados (2008 y 2016, obtenidos a partir de los mapas 2000 - 2008) y los reales. En la Tabla 8 y Tabla 9, se muestran los porcentajes de error al comparar las áreas de las zonas de los mapas simulados con los reales de los años mencionados.

Figura 15. Mapas de cobertura y uso de suelo de la Cuenca del río Capucuy del año 2008 real y simulado (obtenido a partir de los mapas de 2000 y 2008)

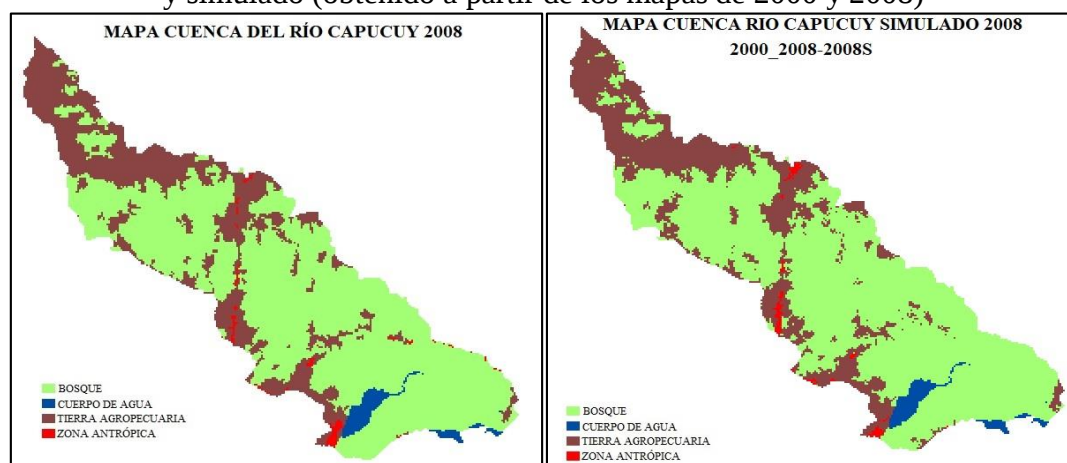
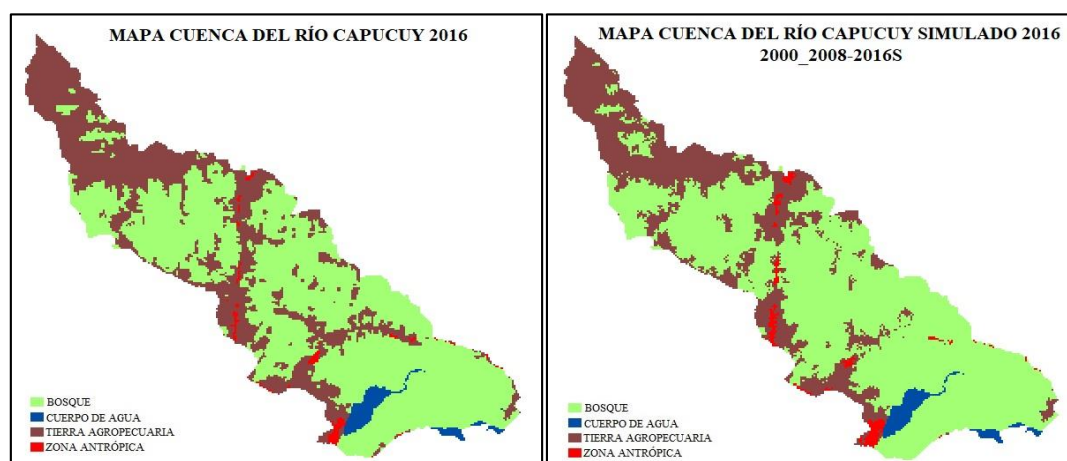


Tabla 8. Porcentajes de error del mapa de cobertura y uso de suelo simulado del 2008 a partir de mapas del 2000 y 2008

Zona	2000	2008	2008 Simulado	% Error
Área bosque (ha)	10323,71	10024,32	10057,48	0,33
Área cuerpo de agua (ha)	314,78	314,78	309,07	1,81
Área tierra agropecuaria (ha)	3831,62	4021,78	4055,76	0,84
Área zona antrópica (ha)	29,44	138,68	135,30	2,43
Área cuenca (ha)	14499,55	14499,55	14557,62	0,40

Figura 16. Mapas de cobertura y uso de suelo de la Cuenca del río Capucuy del año 2016 real y simulado (obtenido a partir de los mapas de 2000 y 2008)



ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

Tabla 9. Porcentajes de error del Mapa de cobertura y uso de suelo simulado del 2016 a partir de mapas del 2000 y 2008

Zona	2000	2008	2016	2016 Simulado	% Error
Área bosque (ha)	10323,71	10024,32	9107,32	9775,60	2,48
Área cuerpo de agua (ha)	314,78	314,78	315,46	309,07	1,81
Área tierra agropecuaria (ha)	3831,62	4021,78	4917,99	4218,25	4,89
Área zona antrópica (ha)	29,44	138,68	158,78	254,69	83,66
Área cuenca (ha)	14499,55	14499,55	14499,55	14557,62	0,40

En la Figura 17 se muestra una comparación entre los mapas de cobertura y uso de suelo 2008 y el 2016 (MAE, 2016). Mientras que en la Figura 18 se presenta una comparación entre el mapa simulado del 2016 (obtenido a partir de los mapas 2008 – 2016) con el real.

Figura 17. Mapas de cobertura y uso de suelo de la Cuenca del río Capucuy de los años 2008 y 2016 (MAE, 2016)

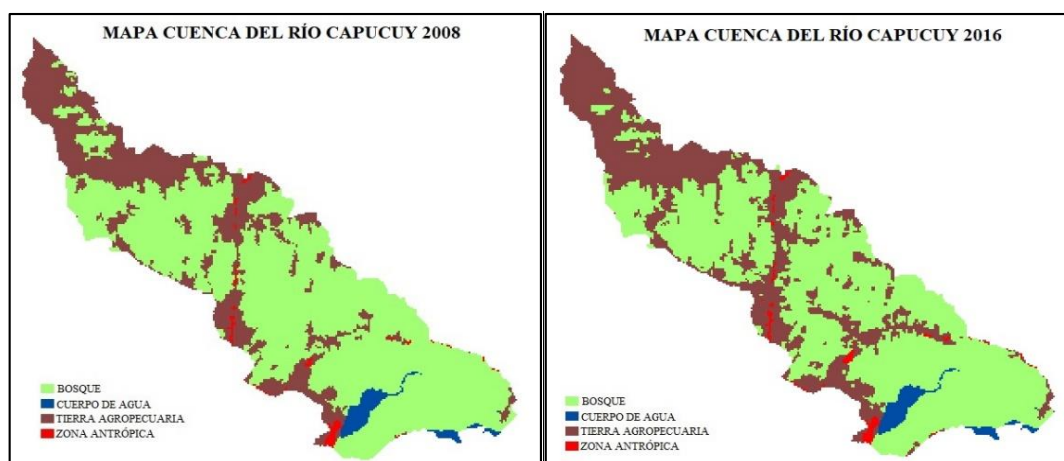
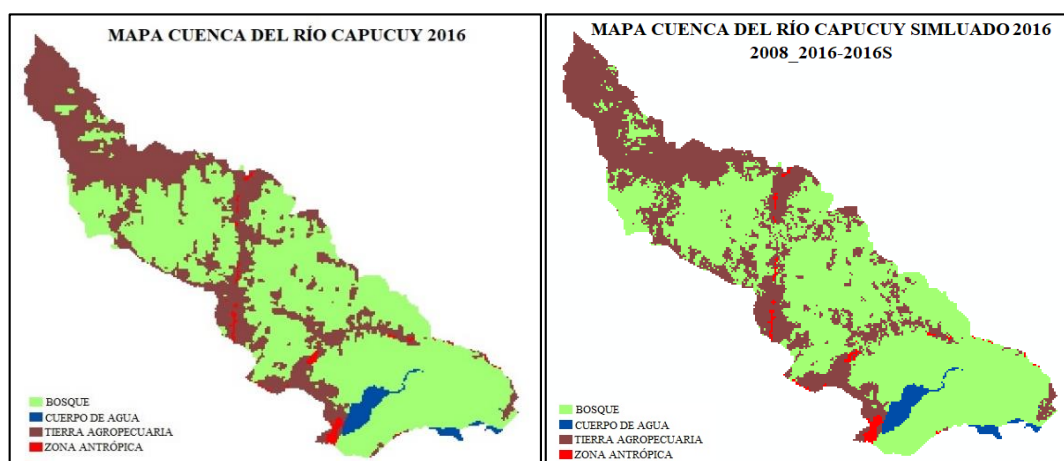


Figura 18. Mapas de cobertura y uso de suelo de la Cuenca del río Capucuy del año 2016 real y simulado (obtenido a partir de los mapas de 2008 y 2016)



ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

En la Tabla 10, se muestran los porcentajes de error al comparar las áreas de las zonas del mapa simulado y real del 2016.

Tabla 10. Porcentajes de error del mapa de cobertura y uso de suelo simulado del 2016 a partir de mapas del 2008 y 2016

Zona	2008	2016	2016 Simlado	% Error
Área bosque (ha)	10024,32	9107,32	9134,91	0,30
Área cuerpo de agua (ha)	314,78	315,46	309,07	2,02
Área tierra agropecuaria (ha)	4021,78	4917,99	4949,82	0,65
Área zona antrópica (ha)	138,68	158,78	163,82	3,18
Área cuenca (ha)	14499,55	14499,55	14557,62	0,40

En la Figura 19 se presenta el mapa de cobertura y uso de suelo simulados del 2026 a partir de los mapas del 2000 – 2008 y se compara el mapa del 2016 real. Además en la Tabla 11 se muestran los cambios de las áreas en el 2026 con respecto al mapa del 2016.

Figura 19. Comparación del mapa del 2026 simulado (obtenido a partir de los mapas del 2008 - 2016) con respecto al mapa del 2016 real

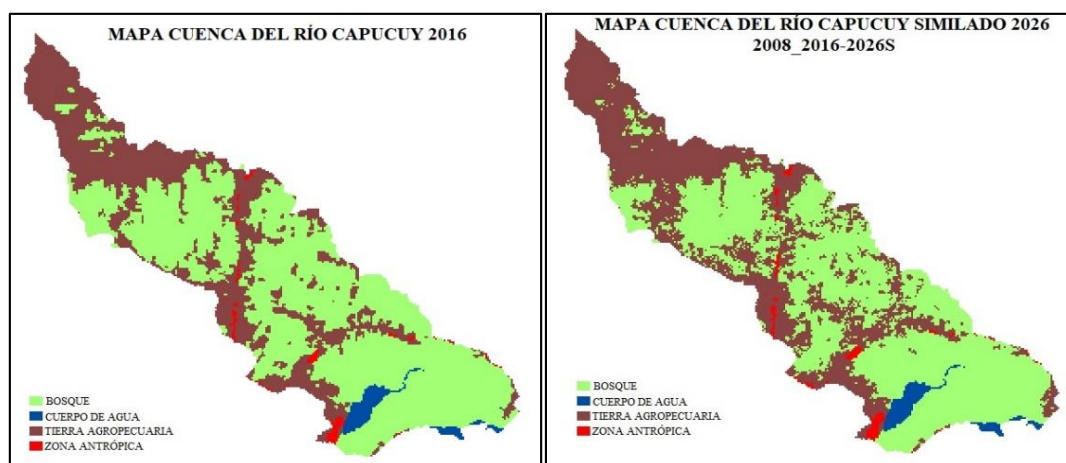


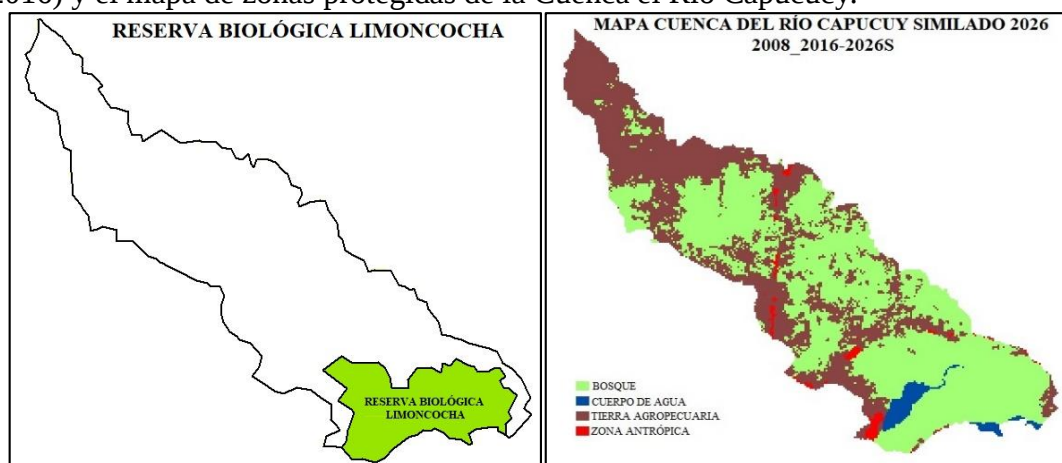
Tabla 11. Porcentaje cambio de las áreas del mapa del 2026 simulado (obtenido a partir de los mapas del 2008 - 2016) con respecto al mapa del 2016 real

ZONA	2016		2026 S (2008 - 2016)		Diferencia Área (%) (2016 – 2016 S)	% Cambio 2016 – 2026S
	Área (ha)	Porcentaje (%)	Área (ha)	Porcentaje (%)		
Bosque	9107,32	62,81	8240,19	56,83	5,98	9,52
Cuerpo de agua	315,46	2,18	309,74	2,14	0,04	1,81
Tierra agropecuaria	4917,99	33,92	5812,70	40,09	6,17	18,19
Antrópica	158,78	1,10	194,99	1,34	0,25	22,81
Cuenca (ha)	14499,55	100,00	14557,62	100,40	0,40	0,40

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

Con la Finalidad de determinar si la Reserva Biológica de Limoncocha será afectada en el 2026, en la Figura 20 se presenta una comparación entre el mapa simulado del 2026 y el mapa de zonas protegidas de la Cuenca el Río Capucuy.

Figura 20. Comparación entre el mapa simulado del 2026 (obtenido a partir de los mapas de 2008 y 2016) y el mapa de zonas protegidas de la Cuenca el Río Capucuy.



A continuación en la Tabla 12 se presentan los mejores valores encontrados de tamaño, variación e isometría del parche y del expansor y el porcentaje de expansión empleados en la simulación. En esta tabla se ha representado las zonas con la siguiente numeración: (1) Bosque, (2) Cuerpo de agua, (3) Tierra agropecuaria y (4) Zona antrópica.

Tabla 12. Valores de tamaño, variación e isometría del patcher y del expander y el porcentaje de expansión.

Mapas	Transiciones		Patcher			Expander			
	De	a	Tamaño (ha)	Variación (ha)	Isometría	Porcentaje	Tamaño (ha)	Variación (ha)	Isometría
1990 - 2000	1	3	2,65	5,31	1,5	0,1	2,0	5,31	1,5
	1	4	2,65	5,31	1,5	0,1	2,0	5,31	1,5
	3	1	2,65	5,31	1,5	0,1	2,0	5,31	1,5
	3	4	2,65	5,31	1,5	0,1	2,0	5,31	1,5
2000 - 2008	1	3	2,65	5,31	1,5	1,0	3,5	5,31	1,5
	1	4	2,65	5,31	1,5	0,9	0,1	5,31	1,5
	3	1	2,65	5,31	1,5	0,9	0,1	5,31	1,5
	3	4	2,65	5,31	1,5	0,9	0,1	5,31	1,5
2008 - 2016	1	3	2,65	5,31	1,5	0,1	2,0	5,31	1,5
	3	1	2,65	5,31	1,5	0,1	2,0	5,31	1,5
	3	2	2,65	5,31	1,5	0,1	2,0	5,31	1,5
	3	4	2,65	5,31	1,5	0,1	2,0	5,31	1,5

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

Discusión.

Con base la Figura 9 que muestra los porcentajes de la zonas de la Cuenca del río Capucuy en los años 1990, 2000, 2008 y 2016 se puede evidenciar que la zona más afectada de la cuenca ha sido el bosque ya que de 1990 al 2000 ha disminuido en un 16,5 %, del 2000 al 2008 en un 2,1 % y del 2008 al 2016 en un 6,3 %, dando una disminución total del 24,9 % de bosque equivalentes a 3605 ha aproximadamente en 26 años. Por otra parte se puede ver que el bosque se ha visto reemplazado por tierra agropecuaria teniendo una disminución del área del 16,3 % de 1990 al 2000, de 1,3 % del 2000 al 2008 y del 6,2 % del 2008 al 2016. Además, se observa que en el 2000 aparece una nueva zona que es la zona antrópica la cual ocupa un área del 0,2 % de la cuenca y en el 2016 la misma abarca un área del 1,1 % de la cuenca. Los resultados antes mostrados indican que la principal transición que se ha dado en la Cuenca del río Capucuy desde 1990 al 2016 es el cambio de bosque a tierra agropecuaria, notándose que la mayor transición se da de 1990 al 2000.

Al analizar los datos presentados en la Tabla 4 acerca de las transiciones de las áreas de los mapas de cobertura y uso de suelo de la Cuenca del río Capucuy del año 1990 al 2000 de acuerdo a la simulación en el programa Dinámica EGO, se observa que las transiciones más representativas se dan de bosque a tierra agropecuaria con un 19,627 % y de tierra agropecuaria a bosque con un 8,168 %. Además, se muestra que tanto el bosque como la zona agropecuaria han sufrido una transición a zona antrópica del 0,047 % y 1,309 %, respetivamente. Estas transiciones evidencian nuevamente que la zona más afectada es el bosque el cual pasa a ser tierra agropecuaria y a su vez vuelve a convertirse en bosque.

Al examinar las Figura 11, Figura 12 y Figura 13 en las cuales se compara los mapas reales con los simulados de los años 2000, 2008 y 2016 obtenidos a partir de los mapas de 1990 y 2000, se observa que en los mapas simulados la zona antrópica aparece en cualquier parte de la Cuenca del Río Capucuy y en proporciones lejanas a la realidad con un error del 625,35 %

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

en el mapa del 2000, un 130,53 % en el 2008 y un 116,38 % en el 2016 de acuerdo a los datos de la Tabla 5, Tabla 6 y Tabla 7, respectivamente. Estos porcentajes de error revelan que la simulación obtenida no se ajusta a la realidad de la cuenca, lo cual se explica al analizar los mapas de 1990 y 2000 proporcionados por el del MAE (2016) presentados en la Figura 10, en los mismos que se observa que en 1990 no existe zona antrópica mientras que en el 2000 esta zona ocupa 29, 44 ha (0,20 %) de la cuenca.

Sin embargo, de acuerdo a datos presentados por el INEC en el censo realizado en 1990 el cantón Shushufindi (lugar donde se ubica la Cuenca del río Capucuy), este presentaba una población de 10 576 habitantes. Por otra parte, el estudio realizado por Gil (2017) indica que en el año de 1976 la zona antrópica de la cuenca ocupaba una superficie de 1,33 ha equivalentes al 0,01 % del área de la Cuenca del río Capucuy. Es decir, el mapa de 1990 proporcionado por el MAE (2016) presenta una mala identificación de la zona antrópica, lo cual hace que Dinámica EGO al trabajar como un sistema autómatas celular, donde el estado de cada celda en el arreglo depende de los estados previos de cada celda, trabaje con reglas de transición que no se ajustan a la realidad y por ende se generen errores en la simulación. Razón por la cual no se consideró al mapa de 1990 como insumo cartográfico para obtener el mapa simulado del 2026 que es el objeto de este proyecto.

Por otra parte, al analizar los resultados de la Tabla 5 a la Tabla 10 se observa que el área total de la Cuenca del río Capucuy en los mapas simulados presenta un aumento del 0,4 % con respecto al área real de la cuenca, ya que aumenta de 14 499,55 ha (mapa reales) a 14 557,62 ha. Este error se atribuye a los cambios de formato que deben realizarse mediante el software ARCGIS 10.2.1 para el tratamiento de la información cartográfica, ya que los mapas proporcionados por el MAE (2016) se encuentran como imágenes tipo polígono, mientras Dinámica EGO trabaja con imágenes ráster (GeoTIFF). Al realizar el cambio de formato las imágenes pasan de una representación vectorial (polígono) de la componente espacial de los

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

datos geográficos a una imagen digital representada en mallas (pixels, también conocidos como celdas de la cuadrícula), lo cual hace que el área de los mapas varíe.

Con base en los datos de la Tabla 4, se observa que al emplear los mapas de cobertura y uso de suelo de la Cuenca del río Capucuy del 2000 y 2008 las transiciones más representativas se dan de bosque a tierra agropecuaria con un 0,659 % y de tierra agropecuaria a bosque con un 0,736 %. La Figura 15 que presenta el mapa simulado de cobertura y uso de suelo del año 2008 obtenido a partir de los mapas del 2000 – 2008 evidencia que la simulación se ajusta al sistema de cambio de uso de suelo y cobertura de la cuenca. Esto se corrobora en los datos presentados en la Tabla 8, en la cual al comparar las área de las zonas de los mapas del 2008 simulado y real se observa que el error máximo se presenta es en el área de la zona antrópica con un 2,43 %, seguido del cuerpo de agua con un error del 1,81 %, la tierra agropecuaria con un 0,84 % y el bosque con un 0,33 %, porcentajes de error que se encuentran dentro de los límites de tolerancia del objetivo de esta simulación.

Por otra parte, en la Figura 16 a simple vista se observa que el mapa de cobertura y uso de suelo de 2016 simulado se asemeja al mapa real. Sin embargo al analizar los datos de la Tabla 9 se verifica que el porcentaje de error del área de la zona antrópica con respecto al área de real del mapa del 2016 es del 83 %. Este valor indica que la simulación no se ajusta al cambio de suelo y cobertura de la cuenca, sin embargo es importante cuestionarse ¿porque el mapa del 2008 obtenido a partir de los mapas de 1990 y 2000 se ajusta perfectamente al modelo de simulación mientras que el mapa del 2016 obtenido bajo los mismos parámetros presenta tanta dispersión?, la respuesta radica en que del año 2000 al 2008 el área de la zona antrópica varía de 29,44 h a 138,68 ha, es decir aumenta 4,71 veces en 8 años. Mientras que en el año 2016 el área que ocupa la zona antrópica llegó a 158,78 ha, es decir aumento 1,14 en el mismo lapso de tiempo (8 años).

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

Al ser Dinámica EGO un software que trabaja como un sistema autómatas celular que sigue reglas de transición, toma como base las transiciones de los mapas inicial (2000) y final (2008), asumiendo que se mantendrán a lo largo del tiempo, razón por la cual de acuerdo al mapa simulado del 2016 el programa espera que la zona antrópica alcance las 254,69 ha, de acuerdo al patrón de cambio del año 2000 al 2008. Esto a su vez se comprueba con los porcentajes de error presentados en el área de la tierra agropecuaria, bosque y cuerpo de agua que presentan porcentajes de error de 2,48 %, 1,81 % y 2,89 %, respectivamente. Estos porcentajes se ajustan al límite de tolerancia admitido para esta simulación, lo cual se debe a que los cambios de las áreas mencionadas en los años 2000, 2008 y 2016 se ajustan a la regla de transición de la simulación y a su vez son áreas más representativas dentro de la cuenca, lo que permite que las variaciones de las áreas entre los mapas real y simulado del 2016 no sean significativas.

Posteriormente, se analiza la Figura 18 en la cual se compara los mapas real y simulado de la Cuenca del río Capucuy del año 2016. El mapa simulado se obtuvo a partir de los mapas del 2008 y 2016 presentados en la Figura 17, los mismos que de acuerdo a los datos de la Tabla 4 las transiciones más representativas se dan de bosque a tierra agropecuaria con 1,753 % y de tierra agropecuaria a bosque con 1,193%. A diferencia de los mapas anteriormente analizados (1990-2000; 2000-2008), en esta ocasión se presenta una transición del 0,002 % de tierra agropecuaria a cuerpo de agua, ya que de acuerdo a los datos de la Tabla 10 del 2008 al 2016 el área del cuerpo de agua varía de 314,78 ha a 316,46 ha, un cambio relativamente insignificante pero que es considerado en la simulación realizada por el programa Dinámica EGO.

La Figura 18 muestra que el mapa simulado del 2016 con respecto al mapa real se ajusta al cambio de suelo y cobertura de la cuenca, esta similitud se ve reflejada en los datos de la Tabla 10 que indica que los porcentajes de error de las áreas del mapa simulado con respecto

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

al real de la zonas antrópica, cuerpo de agua, tierra agropecuaria y bosque son 3,18 %, 2,02 %, 0,65 % y 0,30 %, respectivamente. Es decir, los porcentajes de error de todas las zonas se encuentran dentro de los límites de tolerancia de la simulación. Considerando que Dinámica EGO valida la simulación mediante la comparación del mapa final (2016 real) con el mapa simulado del 2016 obtenido en el antepenúltimo paso, se considera que los mapas 2008 – 2016 permitirán obtener la simulación más fiable del 2026.

Con lo antes expuesto, en la Figura 19 se compara el mapa de cobertura y uso de suelo del 2016 real con el mapa del 2026 simulado (obtenido a partir de los mapas 2008 y 2016). En estos mapas se observa que el bosque es sustituido por tierra agropecuaria, mientras que el cuerpo de agua y la zona antrópica no sufren cambios significativos. Estos resultados eran los esperados de acuerdo a los datos de la Tabla 4 que indican que con base en los mapas del 2008 y 2016 la transición más representativa es la de bosque a tierra agropecuaria con un 1,753 %. La Figura 19 se complementa con los datos de la Tabla 11, en la cual se presentan el porcentaje que ocupa cada una de las zonas con respecto al área total de la cuenca en el 2016 y 2026 y además se indica el porcentaje de cambio de cada una de las zonas con respecto a su área en el 2016. Al analizar los resultados de la Tabla 11 se evidencia que la transición más significativa es la de bosque a tierra agropecuaria, ya que al comparar los datos del 2016 y 2026, el área de la zona boscosa con respecto al área total de la cuenca (14499,55 ha) disminuirá del 62,81 % al 56,83 % equivalente a la pérdida de 867,14 ha de bosque (9,52 % de disminución con respecto al área inicial de la zona). En lo referente al área de la tierra agropecuaria con respecto al área total de la cuenca aumentará del 33,92 % al 40,09 %, equivalente a 894,71 ha (18,19 % de crecimiento con respecto al área inicial de la zona).

Las causas de este impacto pueden explicarse con base en el método geoestadístico de Dinámica EGO basado en los pesos de evidencia, los cuales determinan la influencia de cada una de las variables en la probabilidad espacial de ocurrencia de una transición de cobertura y

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

uso de suelo. De acuerdo a este análisis las variables que obtengan valores negativos o iguales a 0 no tienen ningún peso en la transición. Mientras que las variables con valores mayores a 0 sí influyen en la transición de una cobertura a otra. Los criterios socio-ambientales empleados para la construcción de este modelo fueron las variables de distancia a centros poblados, distancia a pozos petroleros, distancia a roderas, distancia a senderos, distancia a vías y zonas protegidas (Reserva Biológica Limoncocha), cuyos mapas se presentan en el ANEXO A. En el Anexo B se presentan los gráficos de líneas de tendencia que arroja Dinámica EGO para la transición de bosque a tierra agropecuaria al empelar los mapas de 2008 (mapa inicial), 2016 (mapa final) y las variables indicadas en el Anexo A. Es importante mencionar que el programa Dinámica EGO arroja gráficas similares para cada una de las transiciones. Sin embargo, solo se analiza esta transición por ser la más representativa en la simulación del mapa del 2026.

En las Figuras B1, B2, B3, B4, y B5 correspondientes a las variables de distancias a centros poblados, distancia a pozos petroleros, distancia a roderas, distancia a senderos y distancia a vías, respectivamente, la línea de tendencia inicia con un valor mayor a 2 (Eje Y) a una distancia entre 0 a 600 m (eje X) aproximadamente de dichas variables, y va disminuyendo mientras la distancia se hace mayor. Esto indica que los centros poblados, pozos petroleros, roderas, senderos y vías más cercanas a las áreas de transición de bosque a tierra agropecuaria han tenido mayor influencia para que ocurra esta transición. En el caso de las distancias a las zonas protegidas (Figura B6) los pesos de evidencia son inferiores a 1 (Eje Y) y van tomando valores negativos a partir de los 4,5 m de distancia (Eje X), lo que indica que la Reserva Biológica de Limococha no influye en las transiciones de bosque a tierra agropecuaria, lo cual era de esperarse por ser una zona protegida.

Acorde a la Figura 20 la Reserva Biológica de Limoncocha no se ve amenazada en el 2026 por la transición de bosque a tierra agropecuaria. Sin embargo, al demostrar mediante los pesos de evidencia que los centros poblados, pozos petroleros, vías, senderos y roderas tienen

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

gran influencia en la transición de bosque a tierra agropecuaria, es importante notar que de acuerdo a los datos de la Tabla 11 la zona antrópica en el 2026 aumenta en un 0,25 % con respecto al área total de la cuenca en el 2016. Este porcentaje a simple vista parece insignificante pero en realidad representa un aumento del 22,81 % con respecto a las 158,78 ha que ocupa la zona antrópica en el 2016. Demostrando de esta manera que el crecimiento de zona antrópica afecta directamente a la desaparición de bosque porque el incremento de población humana ocasiona mayor demanda de alimento, por ende mayor presión en los recursos del bosque y fragmentación de los mismos, originando procesos de deforestación lo cual afecta directamente al hábitat de los animales. Además, el crecimiento de la población busca abrir nuevas fronteras agrícolas y mejorar la “productividad de la tierra” lo cual se ve reflejado en el aumento de 894,71 ha de tierra agropecuaria. También es relevante considerar que la construcción de infraestructura bajo modelos convencionales (alcantarillado con desagüe a la laguna), puede ocasionar daños al ecosistema.

Con lo anteriormente expuesto es posible concluir que aunque el aumento de zona antrópica sea teóricamente insignificante con respecto al área total de la cuenca, es el factor principal de la transición de bosque a tierra agropecuaria, siendo este un problema que se puede resolver con el establecimiento de programas de planificación familiar y mejora en la oferta de servicios básicos. Además, con ayuda de la participación del Estado y los gobiernos locales, a través del Ministerio del Ambiente y de Ministerio de Educación se pueden establecer programas de educación ambiental, a fin de cambiar el comportamiento de las comunidades frente al ambiente.

Por otra lado, los datos de la Tabla 11 indican que la zona de cuerpo de agua en el 2026 ocupará un 0,04 % menos del área que ocupaba en el 2016, este cambio es mínimo y podría atribuirse al error sistemático de cambio de formato de polígono a ráster (explicado anteriormente) que hace que el área total de la cuenca aumente en un 0,4 %.

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

Finalmente, se analizan valores de los parámetros del Patcher y Expander, el tamaño, la varianza e isometría, y los valores de los porcentajes de cambio para cada una de las coberturas (patcher y expader), los mismos que se presentan en la Tabla 12. De manera general es posible decir que el tamaño del patcher y expander y sus diferentes parámetros se establecen en función de criterios de expertos, en este caso específico dichos parámetros se definieron con base en los criterios de Soares-Filho, Rodrigues, & Costa (2009) fijando el tamaño del patcher en 2,65 ha, la variación del tamaño en 5,31 ha y la isometría en 1.5. Dado que el tamaño de celda es igual a 0,66 hectáreas (81,44 m x 81,44 m), de esta manera los parches que se formarán tendrán en promedio 4 celdas y una variación de 8 celdas. El porcentaje de expansión y del parche se fue variando con base en un criterio de prueba y error, verificando que el “mapa real observado” se ajuste al mapa simulado. Cabe mencionar que los parámetros establecidos para el patcher y expander pueden modificarse cuantas veces sea necesario (pero un solo parámetro a la vez). En las Figuras del Anexo C se puede observar los mapas simulados del 2000, 2008 y 2016 obtenidos sin parches ni expansores, con parches y con parches y expansores. Estos mapas evidencian que el valor de estos parámetros juega un papel muy importante en la simulación ya que permiten la formación de nuevos parches y la expansión o contracción de coberturas de suelo ya existentes, mejorando de esta manera la similitud de los mapas simulados con los reales.

Conclusiones.

El modelo simulado que mejor se ajusta al cambio de uso de suelo y cobertura de la Cuenca del Río Capucuy en el 2026, es el obtenido con los mapas 2008 – 2016, presentando un porcentaje de error del 0,30 % en el zona del bosque, 2,02 % en cuerpo de agua, 0,65 % en la tierra agropecuaria y 3,18 % en la zona antrópica. Estos porcentajes de error se ajustan al límite de tolerancia admitido para esta simulación.

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

Los mapas simulados presentan un aumento del 0,4 % del área total de la Cuenca del río Capucuy, lo cual se atribuye a un error sistemático que se genera debido a los cambios de formato de polígono a ráster que deben realizarse para llevar a cabo la simulación en el software Dinámica EGO.

Dinámica EGO emplea un modelo de autómatas celulares para cobertura vegetal y uso de suelo que es confiable en la medida que se establezcan los parámetros para las reglas locales del AC: patcher y expander. En la simulación del mapa de cobertura y uso de suelo de la Cuenca del Río Capucuy en el 2026, los parámetros que mejor se ajustaron a cada una de las transiciones (mapas 2008 – 2016), fueron: tamaño medio del parche 2,65 ha, tamaño de la varianza del parche y expansor 5,31 ha e isometría 1,5. Se estableció 0,1 como porcentaje de expansión y el tamaño del expansor de 2,0 ha.

La transición más representativa en la simulación del mapa de cobertura de uso de suelo y cobertura vegetal del 2026 (al emplear los mapas de 2008 y 2016) con respecto al 2016, es la de bosque a tierra agropecuaria. La zona boscosa con respecto al área total de la cuenca (14499,55 ha) disminuirá del 62,81 % al 56,83 % equivalente a la pérdida de 867,14 ha de bosque (9,52 % de disminución con respecto al área inicial de la zona). En lo referente al área de la tierra agropecuaria con respecto al área total de la cuenca aumentará del 33,92 % al 40,09 %, equivalente a 894,71 ha (18,19 % de crecimiento con respecto al área inicial de la zona).

Al analizar el área de la zona antrópica en el 2026 con respecto al 2016, se tiene que la zona antrópica aumenta en un 0,25 % con respecto al área total de la cuenca, lo cual representa un aumento del 22,81 % con respecto a las 158,78 ha que ocupaba la esta zona en el 2016.

El método geoestadístico de Dinámica EGO basado en los pesos de evidencia, demuestra que la transición de bosque a tierra agropecuaria en el 2026 está influenciada por los

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

centros poblados, pozos petroleros, roderas, senderos y vías más cercanas a las áreas de transición (entre 0 y 600 m de distancia). Esto a su vez demuestra que el aumento de la zona antrópica en el 2026 afecta directamente en la transición de bosque a tierra agropecuaria.

A pesar de que en el mapa simulado del 2026 no muestra cambios en la cobertura y uso de suelo en la Reserva Bilógica de Limoncha, el crecimiento de la zona antrópica puede generar presión en los recursos del bosque y fragmentación de los mismos. Además, la construcción de infraestructura bajo modelos convencionales (alcantarillado con desagüe a la laguna), puede ocasionar daños al ecosistema. Por lo que a fin de manejar estos posibles impactos ambientales se propone realizar programas de planificación familiar y mejora en la oferta de servicios básicos, así como establecer programas de educación ambiental con el apoyo del Ministerio del Ambiente y de Ministerio de Educación a fin de cambiar el comportamiento de las comunidades frente al ambiente.

Agradecimientos.

A mi tutor el Mgs. José Salazar por su apoyo y guía durante la ejecución de este trabajo, quien hizo de este un verdadero reto, en el cual encontré muchos obstáculos que pude resolverlos gracias a su conocimiento y paciencia. Al Dr. Juan Carlos Navarro por el seguimiento continuo que dio a este proyecto de titulación, el cual permitió mejorar el enfoque del mismo. A la Mgs. Susana Chamorro por sus aportes y observaciones que han permitido pulir el trabajo realizado.

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

Bibliografía.

- Almeida, C. Batty, M. Vieira, A. Câmara, G. Soares-Filho, B. Cerqueira, G. & Lopes C. (2003): Stochastic Cellular Automata Modeling of Urban Land Use Dynamics: Empirical Development and Estimation. *Computers, Environment and Urban Systems*. 27 (5). 481-509.
- Camacho, J., Juan, J., Pineda, N., Cadena, E., Bravo, L., & Sánchez, M. (2015). Cambios de cobertura / uso de suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña. *Madera y Bosques*. 22 (1). 93-112
- Camacho, M., Molero, E., & Paegelon, M. (2014). Modelos geomáticos aplicados a la simulación de cambios de usos del suelo. Evaluación del potencial de cambio. *Tecnologías de la Información Geográfica: la Información Geográfica al Servicio de los Ciudadanos*. Recuperado de <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01063442/document>.
- Corrales, G. Plata, W. Hinojoza, G. y Aguilar, J. (2014). Análisis de los cambios de uso y cobertura del suelo para el Estado de Sinaloa mediante Sistemas de Información Geográfica. XVI Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica Alicante, España: Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Universidad Autónoma de Sinaloa.
- Eastman, J. (2009). IDRISI Taiga: Guide to GIS and image processing. Clark University, Worcester, MA.
- Eastman, J. (2012). IDRISI Selva Tutorial. Manual versión 17. Clark University
- Espinoza, V. (2017). Dinamica EGO: Una herramienta gratuita para modelar y brindar soporte en el análisis del CCUS. Colegio de Geografos del Perú. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/312118381>
- Galicia, L., García, A., Gomez, L., & Ramírez, M. (2018). Cambio de uso suelo y degradación ambiental. *Revista Ciencia*. Recuperado de <http://www.revistaciencia.amc.edu.mx/index>.

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

[php/ediciones-antiores?task=view&id=135](http://ediciones-antiores?task=view&id=135).

Gil, C. (2017). “Análisis del uso del suelo y cobertura vegetal de la Cuenca del río Capucuy al año 1976” (Tesis de maestría en Gestión Ambiental). Universidad Internacional SEK, Quito, Ecuador.

Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (1990). Resultados Censo de Población. Recuperado de <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/informacion-censal-cantonal/>

Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2017). Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua 2017. Recuperado de http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac_2017/Informe_Ejecutivo_ESPAC_2017.pdf

Johnson, B., & Zuleta, G. (2013). Land-use land-cover change and ecosystem loss in the Espinal ecoregion, Argentina. *Agriculture, ecosystems & environment* 181: 31-40.

López, V., Balderas, M., Chávez, M., Pérez, J., & Gutiérrez, J. (2014). Cambio de uso de suelo e implicaciones socioeconómicas en un área mazahua del altiplano mexicano. *CIENCIA ergo-sum*, 22 (2), 136 – 144

Mas, J., & Sandoval, A. (2011). Modelación de los cambios de coberturas/uso del suelo en una región tropical de México. *Geotrópico*. 5 (1). 1 – 24.

Mertens, B. & Lambin, F. (1997). Spatial modelling of deforestation in southern Cameroon: Spatial disaggregation of diverse deforestation processes. *ELSEVIER*. 17(2). 143-162. [https://doi.org/10.1016/S0143-6228\(97\)00032-5](https://doi.org/10.1016/S0143-6228(97)00032-5).

Padilla, O., Pérez, P., Cruz, M., Huilcamaigua, S., & Astudillo, S. (2015). Utilización de autómatas celulares como técnica de modelamiento espacial para determinación el cambio de uso de suelo y cobertura vegetal. *Revista Ciencias Espaciales*. 8 (1). 310 – 326.

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

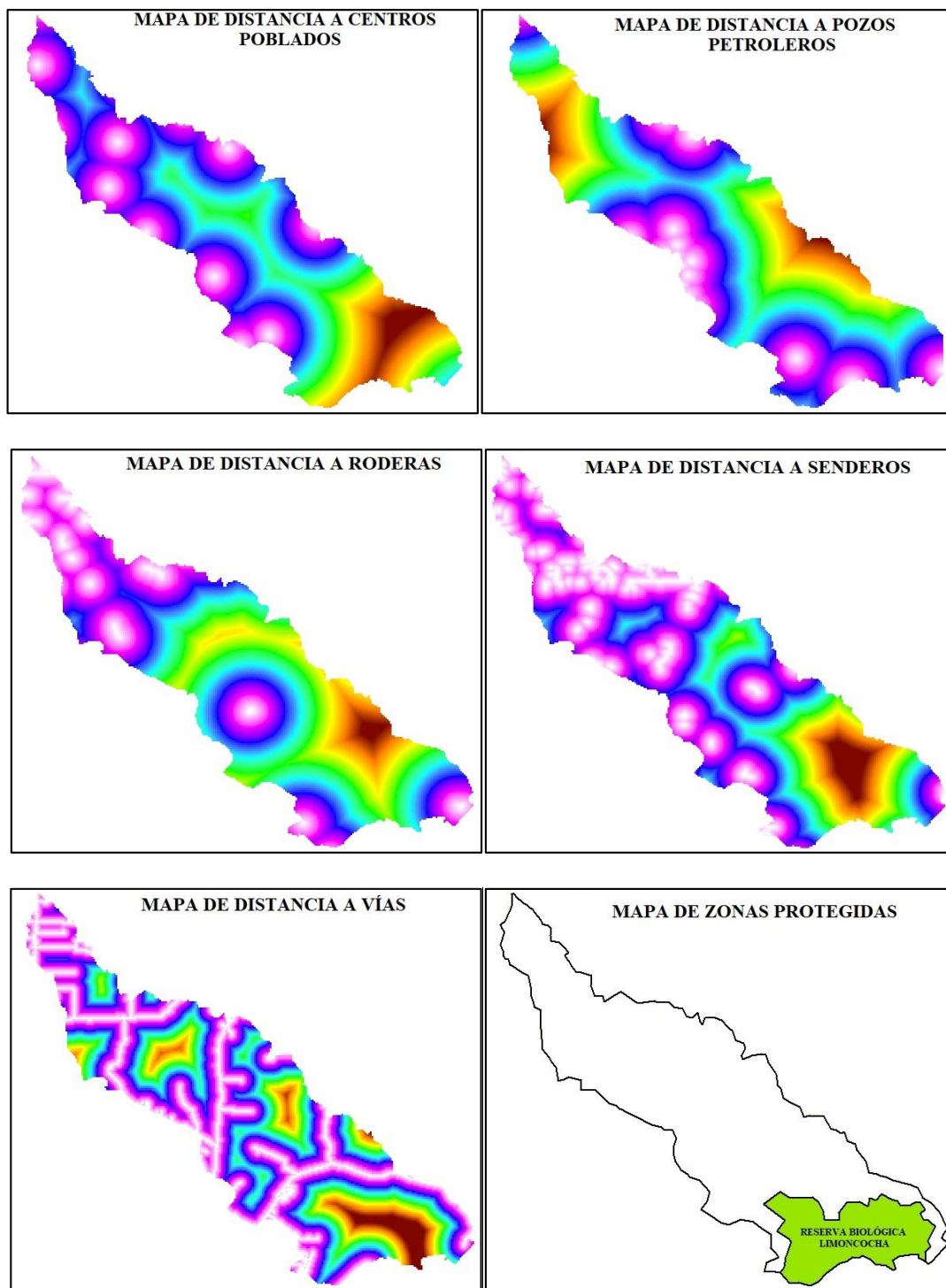
- Rodrigues, H., Soares-Filho, B., & Costa, W.(2007). Dinamica EGO, uma plataforma para modelagem de sistemas ambientais. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 13: 3089-3096.
- Sandoval, V., & Oyarzun, V. (2004). Modelamiento y prognosis espacial del cambio en el uso del suelo. *Revista de Ciencias Forestales – Quebracho*. 11 (1): 9-21.
- Soares-Filho, B., Rodrigues, H., & Costa, W. (2009). Modelamiento de Dinámica Ambiental con Dinamica EGO. *Centro de Sensoriamento Remoto/Universidade Federal de Minas Gerais (CSR/UFGM)*. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/259424297/Dinamica-EGO-guia-pratica-pdf>
- Soares-Filho, B., Cesqueira, G., & Cássio, P. (2002). DINAMICA— a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *ELSEVIER: Ecological Modelling*. 154(1). 217 – 235.
- Trucíos, R., Rivera, M., Delgado, G., Estrada, J., & Cerano, J. (2013).Análisis de cambio de uso de suelo en dos escalas de trabajo. *Terra Latinoamericana*, 31 (1), 339-346.
- Velásquez, A., Bocoo, G., & Siebe, C. (2015). Cambio de uso del suelo. *Red Temática de CONACYT sobre Medio Ambiente y Sustentabilidad*. 1 (1). Recuperado de http://www.wikiensuma.mx/contenido/Cambio_de_uso_del_suelo
- Verburg, P., & Overmans, K. (2009). Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model. 24: 1167. <https://doi.org/10.1007/s10980-009-9355-7>.

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

ANEXO A

A continuación se presenta los mapas de la Cuenca del Río Capucuy de las variables estáticas categóricas y no categóricas empleadas en la simulación con el software Dinámica EGO.

Figura A1. Mapas de variables estáticas categóricas y no categóricas



ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

ANEXO B

A continuación se presentan los gráficos de líneas de tendencia que arroja Dinámica EGO para la transición de Bosque a Tierra agropecuaria al empelar los mapas de 2008 (mapa inicial) y 2016 (mapa final). El eje X está definido por la distancia en metros a la variable, mientras que el eje Y está referido al peso de evidencias o valor que posee dicha variable en la transición.

Figura B1. Pesos de evidencia en función de la distancia a centros poblados

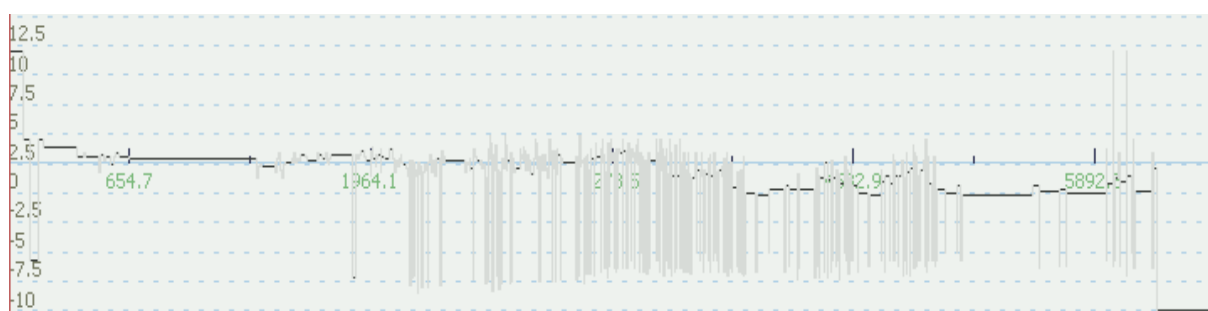


Figura B2. Pesos de evidencia en función de la distancia a pozos petroleros

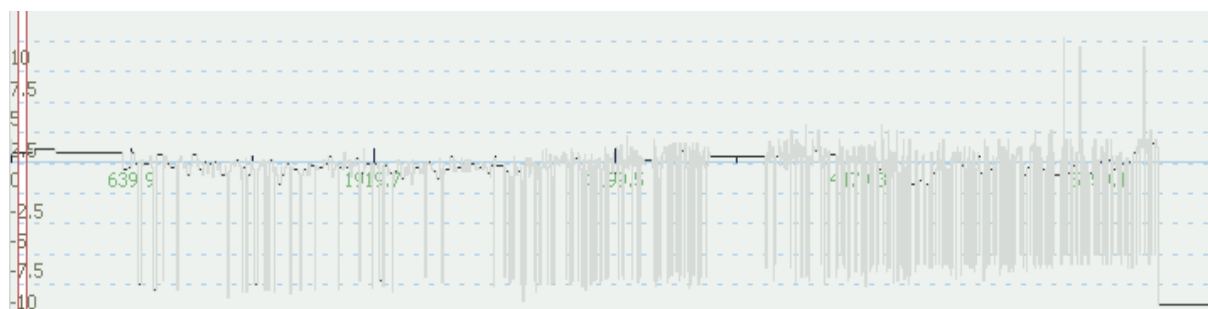
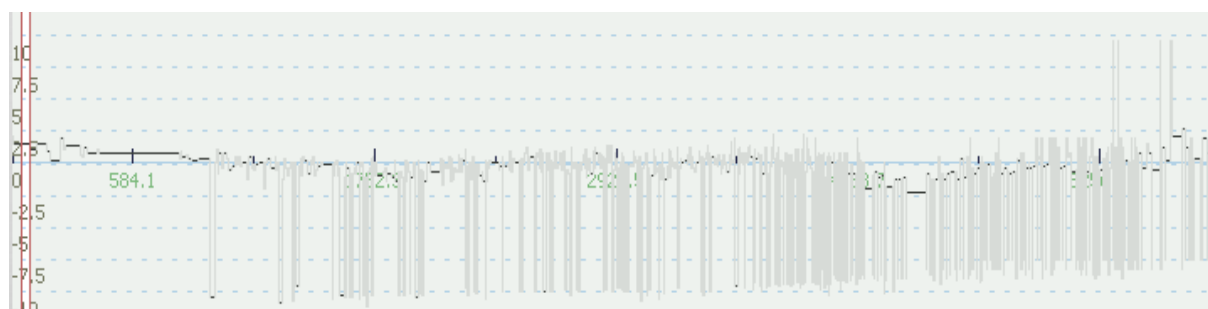


Figura B3. Pesos de evidencia en función de la distancia a roderas



ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

Figura B4. Pesos de evidencia en función de la distancia a vías

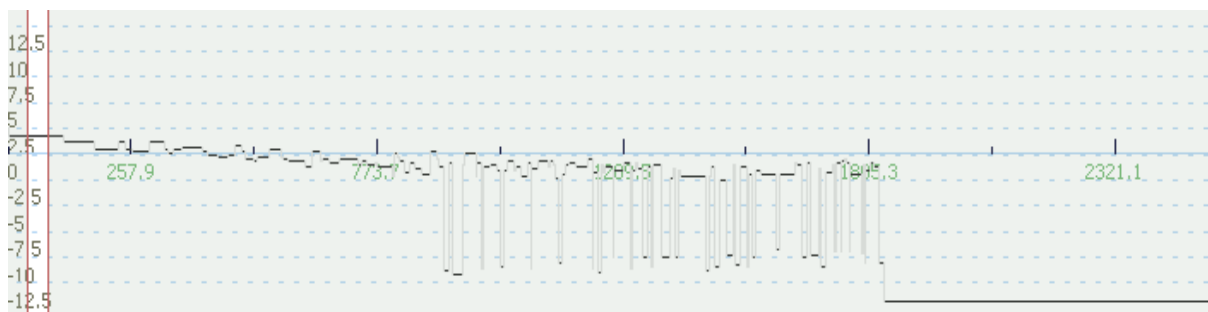


Figura B5. Pesos de evidencia en función de la distancia a senderos

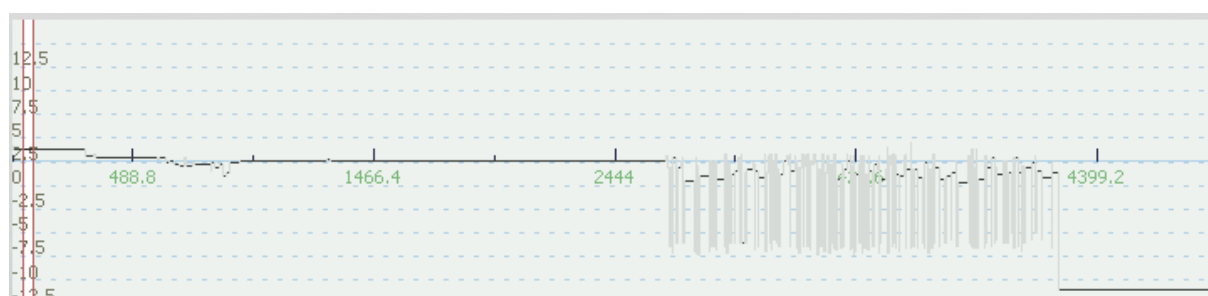
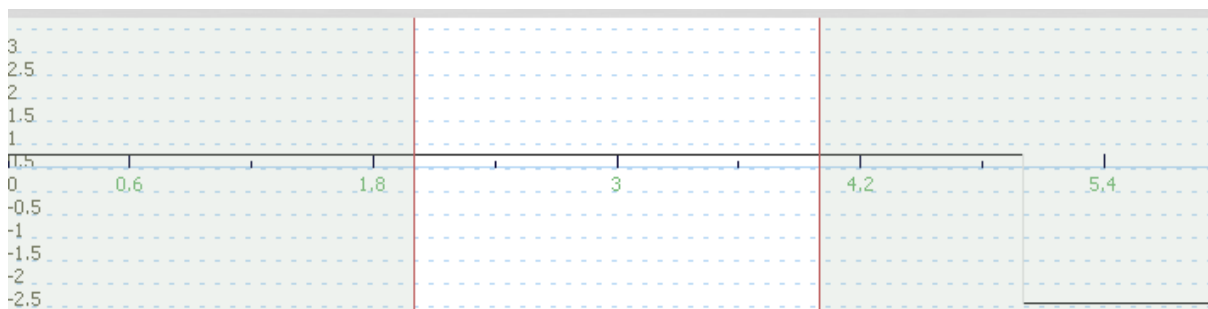


Figura B6. Pesos de evidencia en función de la distancia a zonas protegidas

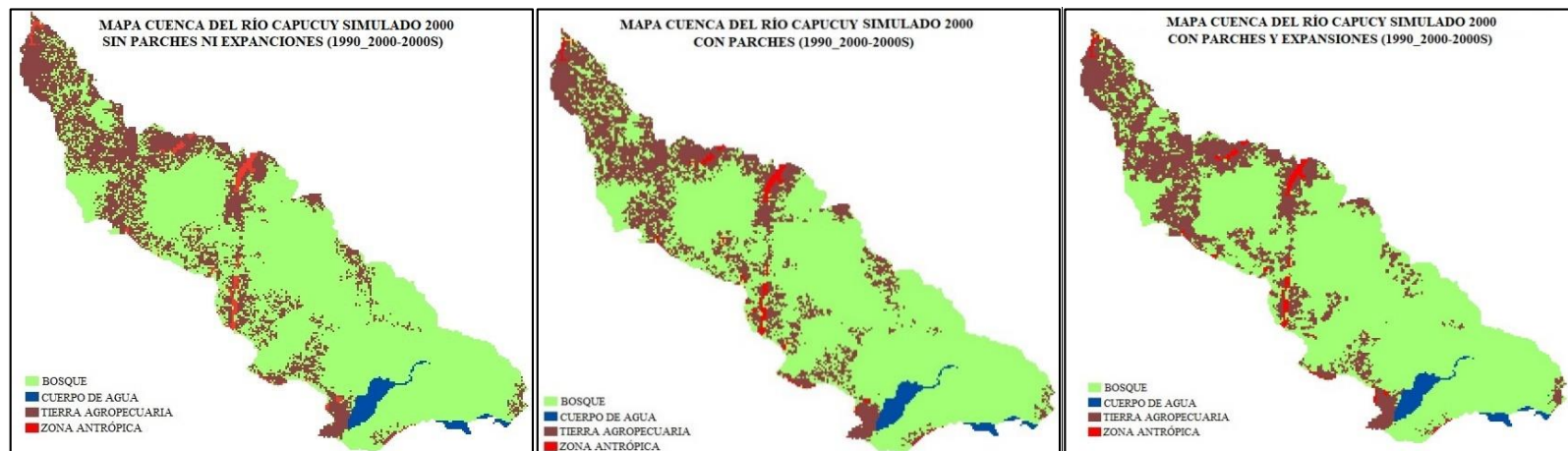


ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

ANEXO C

A continuación en la Figura C1, Figura C2 y Figura C3 se presentan la comparación de los mapas de cobertura y uso de suelo simulados del 2000, 2008 y 2016 obtenidos sin parches ni expansiones, solo con parches y con parches y expansiones, respectivamente

Figura C1. Comparación de los mapas de cobertura y uso de suelo del 2000 de la Cuenca del Río Capucuy obtenidos con el empleo de parches y expansiones



ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO PROSPECTIVO EN LA CUENCA DEL RÍO CAPUCUY

Figura C2. Comparación de los mapas de cobertura y uso de suelo del 2008 de la Cuenca del Río Capucuy obtenidos con el empleo de parches y expansiones

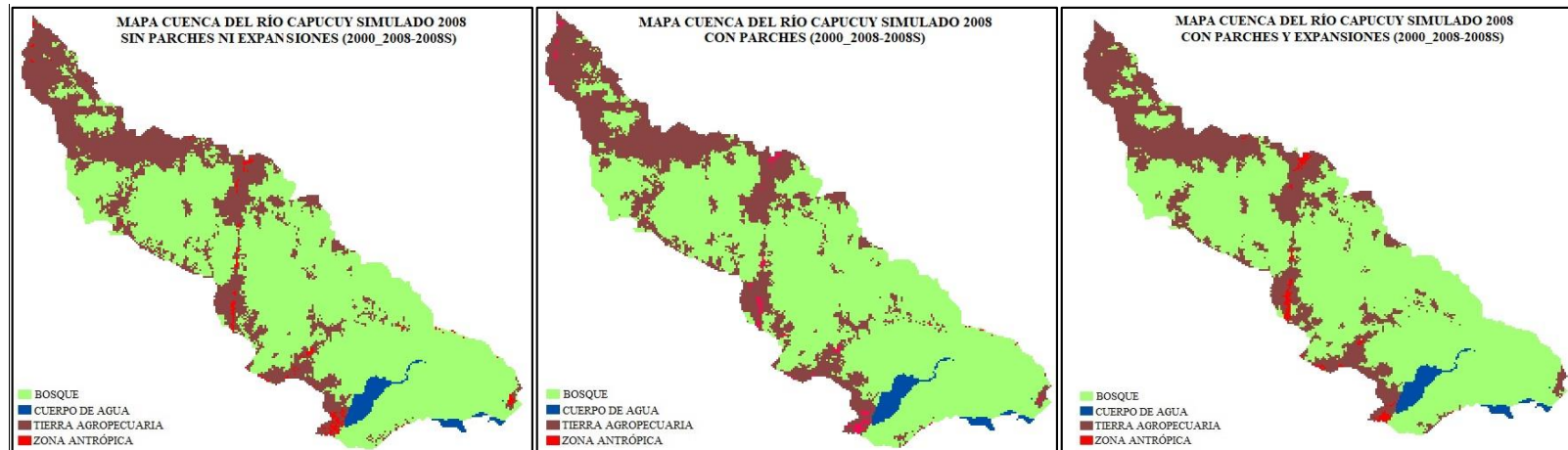


Figura C3. Comparación de los mapas de cobertura y uso de suelo del 2008 de la Cuenca del Río Capucuy obtenidos con el empleo de parches y expansiones

