



MUDANÇAS NO USO DO SOLO NA PROVÍNCIA DE IMBABURA, EQUADOR, NO PERÍODO DE 1990-2020

Juan Pablo Celemín¹

Resumo: O desmatamento é um dos principais problemas ambientais que afetam o Equador. Por esta razão o Ministério do Meio Ambiente do Equador elaborou mapas de uso do solo para os anos 1190, 2000 e 2008 a fim de avaliar a evolução dos usos do solo. Estes mapas têm permitido de realizar a simulação do uso do solo para o ano 2020 a partir do uso de autômato celular presente em um sistema de informação geográfica. Primeiramente foi realizada uma simulação para o ano de 2008 que foi comparada com o mapa real desta data a fim de provar a robustez do processo. Os resultados indicam que para Imbabura a maior transferência de área de floresta para áreas agrícolas ocorreu no período de 1990 a 2000. No período de 2000 a 2008 a perda de área de floresta foi muito menor enquanto que a tendência no uso do solo para o ano de 2020 mostra uma leve recuperação. No entanto, existem limitações relacionadas à validação dos resultados que obrigam a considerar com cuidado a informação trazida pelas simulações.

Palavras-chave: Mudanças no uso do solo. Equador. Autômato celular. Validação.

1 Introdução

Ecuador es un país que cuenta con aproximadamente 10 millones de hectáreas de varios tipos de bosque que cubren aproximadamente el 55% del país. Por décadas, ha experimentado cambios importantes en la cobertura boscosa, en su mayoría por cambios en el uso de suelo. Según datos del año 2000, se estima que 198.000 hectáreas de bosque se pierden cada año, sin embargo, datos más recientes calculados por el Ministerio del Ambiente del Ecuador estiman que la tasa de deforestación es de 61.764,50 hectáreas/año.

Los bosques del Ecuador se encuentran principalmente en manos del Estado ecuatoriano y los pueblos y nacionalidades indígenas. El estado ecuatoriano cuenta con 4.754.725 de hectáreas de bosques nativos dentro del sistema de Áreas Naturales Protegidas y alrededor de 2.055.608 de hectáreas en el Patrimonio Forestal (MINISTERIO DEL AMBIENTE DEL ECUADOR, 2011).

El sector forestal tiene un aporte significativo en el nivel de empleo del Ecuador; se ha estimado que este sector genera aproximadamente 200 mil empleos directos, es decir, 8,4% de la población

económicamente activa. Estos empleos se distribuyen en 73.440 en artesanía y 126.268 en la industria forestal y maderera. Además, el sector genera cerca de 35.000 empleos indirectos, contribuyendo con un total de empleos directos e indirectos de 234.708, esto sin contabilizar los empleos generados en otros sectores debido a la cadena productiva de la industria forestal.

El cambio de uso del suelo constituye una de las principales preocupaciones en el sector forestal ecuatoriano, debido a la presión que ejerce sobre los bosques nativos y, en cierta forma, explica el proceso de deforestación del país, por lo que su análisis reviste especial importancia en el desarrollo socio-económico del país. Entre los principales sectores que tienen un impacto directo sobre los bosques, debido al cambio de uso del suelo está el agrícola dado que la expansión de la frontera agrícola constituye una de las principales razones del cambio de uso de suelo.

Por otro lado, de acuerdo con información del sistema estadístico de la FAO se puede asumir que la deforestación persiste dado que entre 1990 y 2007 hubo una pérdida continua de la cobertura forestal, la superficie agrícola se mantuvo relativamente estable pero no la ubicación de la misma. Las superficies con otros usos

¹E-mail: jpcelemín@conicet.gov.ar

REA – Revista de *estudios ambientales* (Online)
v.18, n. 1, p.46-56, jan./jun. 2016

(tierras abandonadas, tierras urbanas, otro tipo de formación boscosa) se incrementaron (MINISTERIO DEL AMBIENTE DEL ECUADOR, 2011).

No obstante, la cuantificación de la superficie boscosa es un proceso muy difícil y permanente que se refleja en las inconsistencias en los datos entre los distintos estudios en cuanto a cobertura forestal en el Ecuador (varían dependiendo del año del estudio y la fuente).

Entre los estudios más recientes, Sierra (2013) sostiene que entre 1990 y 2008 se perdieron cerca de 19000 km² de bosque natural en el país. La cobertura de bosque disminuyó de 69,6% de la superficie forestal potencial del país en 1990 a 63, 5% en el año 2000, y a 60,7% en el 2008. La mayor parte, cerca del 70%, fue deforestada en la década de 1990, con una deforestación anual neta promedio de 1291.5 km². La deforestación anual neta entre el 2000 y el 2008 fue 753,9 km²; 42% menos que en el período anterior. La deforestación bruta y la regeneración, y por lo tanto la deforestación neta, disminuyen con la distancia a caminos: el 90% de la deforestación bruta, regeneración y deforestación neta ocurre a menos de 10 kilómetros de una carretera.

El incremento significativo de la regeneración de bosques acentuó la caída de la deforestación neta total. Entre 1990 y el 2000 se regeneraron 0,3 hectáreas de bosque por cada hectárea deforestada mientras entre el 2000 y el 2008 se regeneraron 0,47 hectáreas de bosque por cada hectárea deforestada; un incremento de alrededor del 50% respecto al período anterior.

Indudablemente el país cuenta con datos de deforestación, pero existen notables diferencias entre los mismos. Por lo tanto, es necesaria la generación de información actualizada sobre los patrones espaciales y el comportamiento de los factores de deforestación en el Ecuador de forma documentada y con un nivel de confianza aceptable.

Por lo mencionado y debido a que la conversión y transformación de ecosistemas naturales a usos y cobertura del suelo antrópicos, que son uno de los principales procesos de afectación a la biodiversidad y el funcionamiento de dichos ecosistemas, el Ministerio del Ambiente del Ecuador implementó el proyecto "Mapa de Histórico de deforestación del Ecuador continental" cuyo objetivo principal es construir el escenario histórico de deforestación de

forma espacialmente explícita a escala nacional para los períodos 1990 – 2000 y 2000 – 2008.

El proyecto Mapa de Deforestación Histórica ha utilizado imágenes LANDSAT y ASTER con la menor cobertura de nubes posible, para generar mapas de deforestación para los períodos 1990 – 2000 y 2000 – 2008. En las regiones donde el país tiene ecosistemas de bosque que presentan importantes variaciones fenológicas, se tiene imágenes de la época seca y húmeda (dependiendo de la disponibilidad de las imágenes). Además, se cuenta con imágenes LANDSAT ETM+ sometidas a procesos de relleno de vacíos de información con el fin de maximizar la cobertura de imágenes para el Ecuador continental.

La clasificación de uso y cobertura del suelo se realizó de forma independiente para cada año de referencia (1990, 2000 y 2008). La fecha efectiva de las imágenes utilizadas puede corresponder a años anteriores o subsiguientes a la referencia de acuerdo a la disponibilidad de imágenes sin cobertura de nubes.

Los mapas generados representan únicamente las seis clases definidas para el Nivel 1 por el IPCC3 (Panel Internacional sobre Cambio Climático) que son: 1) bosques, 2) áreas agrícolas, 3) vegetación arbustiva y herbácea, 4) cuerpos de agua, 5) área antrópica, 6) otras áreas.

Las imágenes fueron rectificadas y corregidas y sometidas a un proceso de clasificación no supervisada. La incertidumbre asociada a los mapas de uso y cobertura se cuantificó mediante la combinación de distintas estrategias (trabajo de campo, uso de imágenes de referencia) de acuerdo al contexto de accesibilidad existente en distintas regiones del Ecuador. Esta incertidumbre está representada por medio del índice estadístico Kappa que a nivel nacional es de aproximadamente 0,7 para las épocas del 1990, 2000 y 2008 (MINISTERIO DEL AMBIENTE DEL ECUADOR, 2012).

Toda esta información, además de aportar valiosa información puntual, puede ser explotada aún más a partir de la utilización de sistemas de información geográfica. En particular puede ser utilizada para proyectar escenarios de uso futuro, que permitan conocer, para este caso en particular, cual es la tendencia de la deforestación.

1.1 Automatas celulares y validación de resultados

El modelado y la proyección del uso de la tierra son fundamentales para la evaluación de los impactos ambientales. La simulación de cambios en el paisaje por accionar antrópico puede servir para establecer las políticas estratégicas que deben modificarse para mejorar las cuestiones ambientales (HOUET; HUBERT-MOY, 2006).

Los modelos de cambio de uso se han transformado en una poderosa herramienta de análisis espacial orientada, principalmente, a los siguientes aspectos: (a) Explorar los variados mecanismos que fuerzan los cambios de uso del suelo y las variables sociales, económicas y espaciales que conducen a esto; (b) Proyectar los potenciales impactos ambientales y socioeconómicos derivados de los cambios en el uso del suelo, y; (c) Evaluar la influencia de alternativas políticas y regímenes de manejo sobre los patrones de desarrollo y uso del suelo (AGUAYO et al., 2007).

Los autómatas celulares son una poderosa herramienta para la modelización dinámica de uso del suelo, que toma en cuenta las interacciones espaciales al momento simular diferentes escenarios de uso del suelo. Por su parte, la cadena de Markov es una herramienta conveniente para el modelado de los cambios de uso del suelo para el establecimiento de "tendencias actuales", sin embargo, tiene limitaciones al no tener en cuenta la dimensión espacial y que las probabilidades de transición no son constantes entre los estados del paisaje. Dado que ambos modelos se pueden complementar, un modelo híbrido entre ambos procedimientos es un enfoque interesante para modelar los cambios tanto espaciales y temporales (HOUET; HUBERT-MOY, 2006).

Un autómata celular es un modelo matemático para un sistema dinámico que evoluciona en pasos discretos. Es adecuado para modelar sistemas naturales que puedan ser descritos como una colección masiva de objetos simples que interactúen localmente unos con otros. Una red de autómatas se convierte en autómatas celulares cuando el conjunto de entradas está definido por los estados de las celdas vecinas. Moreno et al. (2009) sostienen que un modelo sencillo debe incluir los siguientes componentes: (1) un espacio de cuadrícula en el que opera el

modelo, (2) estados de las celdas en el espacio de cuadrícula, (3) las reglas de transición, que determinan el proceso dinámico espacial, (4) estado de las celdas vecinas que influyen en la celda central y (5) el número de iteraciones.

El atractivo de los modelos de autómatas celulares radica en que las modelizaciones realizadas muestran patrones de auto-organización espacial a partir de comportamientos locales (BUZAI, 2007). Sin embargo, un reto importante en el desarrollo de modelos de autómata celular es la forma de establecer las normas que rigen el comportamiento del sistema, y la incorporación de heterogeneidad y dinamismo en ellas (BROWN et al., 2004).

La validación de los resultados es una de las tareas más complejas y sin consenso definido en torno a la metodología utilizada para la proyección de escenarios de uso de suelo. Con la validación se pretende asegurar si el comportamiento del modelo corresponde al objetivo para el que fue diseñado a través de la comparación de los resultados obtenidos con datos semejantes del mundo real. No obstante, un modelo no puede simplemente clasificarse como válido o no válido, ya que estas dos clases son los extremos de distintos grados de validez. Además, hay que tener presente que se modelan situaciones futuras basadas en una serie de variables de entrada que pueden alterarse según el escenario deseado, no existiendo datos reales futuros con los que comparar los resultados, por lo que su validación completa resulta bastante difícil, tal es el caso de la proyección al año 2020 en el presente estudio. La validación no debe confundirse con la calibración que consiste en comprobar si la configuración de la estructura y los valores de los parámetros del modelo reflejan correctamente el mundo real (CARVALHO CANTERGIANI, 2011). No obstante, existen restricciones en la calibración debido a la limitación de la información. Por ejemplo, para nuestro estudio es más difícil conseguir mapas de carreteras para los años 1990 y 2000, los cuales seguramente mejorarían la calidad de la proyección. Por lo tanto, los criterios de selección de datos para la calibración limitan el número de variables independientes (PONTIUS et al., 2004).

La inspección visual de los expertos es sin duda la mejor forma de evaluar los resultados de una simulación. Por desgracia esto es muy subjetivo y no reproducible. En consecuencia, han aparecido numerosos

métodos para evaluar los resultados de una simulación de manera objetiva y reproducible cuyo punto en común es la comparación de mapas simulados con otros “reales”. Dado que los mapas de uso de suelo son categóricos, el índice Kappa puede utilizarse para calcular el nivel de coincidencia entre dos mapas. Es por ello que es utilizado con frecuencia para la evaluación de la clasificación de imágenes satelitales y en modelos de simulación.

El índice Kappa es una medida estadística que ajusta el efecto del azar en la proporción de la concordancia observada en variables categóricas. En general se cree que es una medida más robusta que el simple cálculo del porcentaje de coincidencia, ya que tiene en cuenta la coincidencia resultante por casualidad. La particularidad de tener en cuenta al azar es también su mayor crítica al subestimar la concordancia entre categorías las medidas, por lo que puede ser considerado un índice excesivamente conservador de concordancia. El caso más sencillo se presenta cuando la variable cualitativa (categórica) es dicotómica y se están comparando dos métodos de clasificación.

La principal limitación radica en que la mayoría de lugares no cambian su uso de la tierra a lo largo de un período de simulación típica, generando un alto nivel de coincidencia que se reflejan en los índices de evaluación (SUN et al., 2007). Dado que este tipo de modelo no especifica el nivel de precisión deseado a priori, es difícil para entender las bases sobre las cuales algunos trabajos rutinariamente afirman que los resultados son aceptables o no y, como la validación es la parte más débil de las simulaciones, se ignora con frecuencia y, cuando se lleva a cabo, a menudo utiliza métodos engañosos (PONTIUS et al., 2004).

El criterio más popular para validar es conocer el porcentaje de píxeles coincidentes en la imagen real y en la simulada debido a su facilidad de cálculo y aparente facilidad de interpretación; sin embargo, el intérprete debe darse cuenta de que un gran porcentaje de respuestas coincidentes no implica necesariamente que el modelo tiene buena capacidad predictiva. En la mayor parte de la literatura sobre modelización del uso de la tierra se ha encontrado que la cantidad típica del cambio en el paisaje era aproximadamente 10%, por lo tanto, los usos que se mantienen inalterables en la imagen real y en la proyección es del 90%, una medida de

precisión que la mayoría de los intérpretes ingenuos considerarían alta (PONTIUS; MALANSON, 2005).

Tratando de superar las limitaciones enunciadas con anterioridad han surgido nuevos índices que son variaciones del índice Kappa para tratar de abordar esta limitación (PONTIUS et al., 2004, PONTIUS; MALANSON 2005), pero que se caracterizan por un creciente grado de complejidad y requieren conocimiento de experto para entenderlos (MAS et al., 2011), además de presentar algunas limitaciones (PONTIUS; MILLONES, 2008). Es por eso que algunos investigadores continúan utilizando el índice Kappa original (ARSANJANI et al., 2011) dado que aún figura en los tests de validación más modernos, conjuntamente con los índices derivados de Kappa.

2 Métodos

Dado que el MAE desarrollo tres mapas para periodos distintos (1990, 2000 y 2008) se aplicó la metodología de autómatas celular y cadena de Markov a la provincia de Imbabura con doble finalidad. Primero y para probar la utilidad del método de autómatas celular inicialmente se proyectó el año 2008 en base a la cartografía de los años 1990 y 2000. Con posterioridad se comparó con el “verdadero” mapa del año 2008. Así se pudo saber la robustez del procedimiento, y conocer mejor sus restricciones al momento de hacer la proyección al año 2020 en base a los mapas de los años 2000 y 2008. De esta manera se intenta conocer como evolucionarán los usos del suelo para el área de estudio. Se recurrió al programa Idrisi Taiga en el cual el autómatas celular es aplicado por el módulo CA Markov que utiliza el resultado del análisis de la cadena de Markov y aplica un filtro de contigüidad a las celdas para predecir el cambio de un uso de suelo a otro en dos periodos distintos (SUN et al., 2007).

Antes de aplicar el índice Kappa se utilizó una máscara para eliminar los píxeles con valor de cero que se encuentran por fuera de la provincia de Imbabura. Este paso en algunos casos suele ser obviado, generando valores mayores para el índice.

A modo de prueba, la cartografía desarrollada por el MAE fue acotada a la provincia de Imbabura (Figura 1), en la zona andina, al norte del país para que sirva como ejemplo para modelar la pérdida de cobertura boscosa por actividad agrícola y

otros usos. La provincia nos es ajena a los procesos de deforestación mencionados en los párrafos anteriores debido a su gran biodiversidad forestal, estrechamente relacionada con su amplio rango altitudinal. La provincia posee una superficie de 4599 km² con una población total de 418.357 habitantes.

La provincia de Imbabura registró una tasa anual de deforestación anual promedio de 2258 hectáreas para el período 1990-2000 y 1240 hectáreas en el período 2000-2008 (MINISTERIO DEL AMBIENTE DEL ECUADOR, 2012).

Para el presente trabajo, las clases de uso de suelo para la provincia de Imbabura fueron reagrupadas en cuatro categorías, a saber:

-Bosques: compuesto por bosque nativo y plantación forestal.

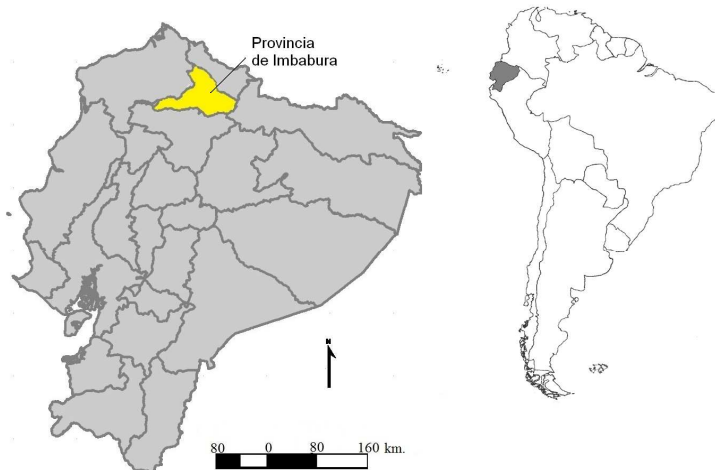
-Área antrópica: compuesta por áreas pobladas e infraestructura.

-Área agrícola: comprendida por las subcategorías cultivo anual, cultivo semipermanente, cultivo permanente, pastizal y mosaico agropecuario

-Vegetación arbustiva y herbácea: comprendida por las subcategorías vegetación arbustiva, páramo y vegetación herbácea.

Además, se creó una máscara de color negro que contiene en el interior de la provincia la suma de las categorías denominadas otras tierras, áreas sin clasificar y cuerpos de agua.

Figura 1 - Ubicación de la provincia de Imbabura en el Ecuador continental



Fuente: Elaboración personal (2016)

3 Resultados

A partir de la cartografía del MAE disponible en formato vectorial se puede observar que para el periodo 1990-2008 los bosques han registrado una pérdida de 31026 ha. (18,79%) a la vez que el área antrópica muestra un aumento muy significativo de 1179 ha. (685,46%). Por su parte las áreas agrícolas registran un incremento 30413 ha. (19,69%) mientras que la vegetación arbustiva y herbácea muestra una pérdida de 1457 ha. (1,4%). Así se confirma para la provincia la misma tendencia registrada a nivel nacional, donde el área forestada pierde superficie en favor del sector agrícola. A su vez, el área antrópica muestra un aumento muy significativo, pero con un valor total aún pequeño en relación a la totalidad del área

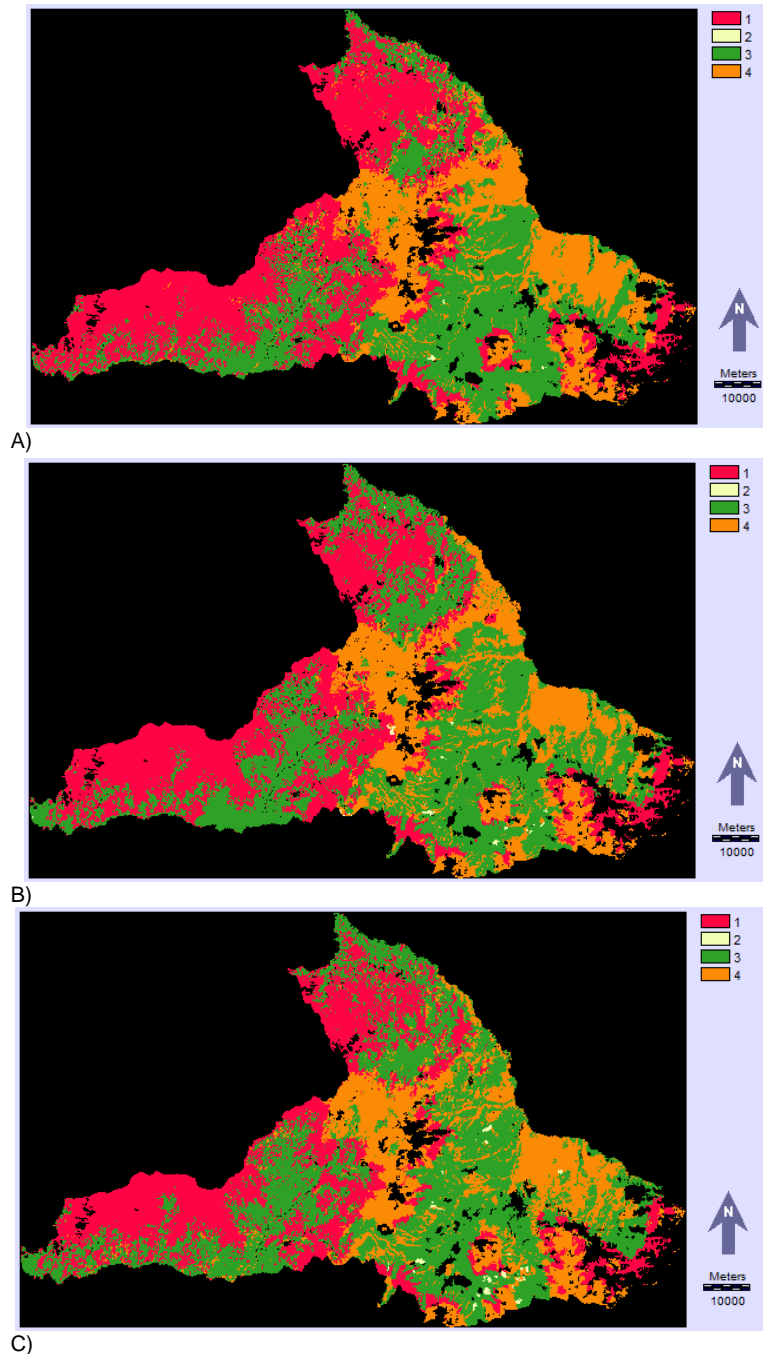
de estudio, mientras que la vegetación arbustiva y herbácea se mantiene relativamente estable. La información desagregada en la Tabla 1 permite observar mejor la evolución de los usos de suelo que en las correspondientes Figuras 2A, B y C dado que visualmente no parecen ser muy distintas entre sí. La reagrupación de las categorías de uso de la cartografía original registra una superficie levemente inferior para el año 2008 en relación a los años 2000 y 1990. La posterior conversión del formato vectorial a raster, necesario para aplicar el procedimiento de autómatas celulares (menos preciso para el cálculo de áreas), también implica que surgieran pequeñas variaciones en la superficie total del área de estudio, situación que continuará en las respectivas proyecciones.

Tabla 1 - Superficie por uso de suelo en la provincia de Imbabura (en hectáreas)

Uso	1990	2000	2008
1 - Bosques	165117	142574	134091
2 - Área antrópica	172	705	1351
3 - Áreas agrícolas	154422	179793	184835
4 - Vegetación arbustiva y herbácea	102500	99139	101043
Superficie total	422211	422211	421320

Fuente: Elaboración personal (2016)

Figura 2 - Uso del suelo en la provincia de Imbabura, A) 1990, B) 2000, C) 2008



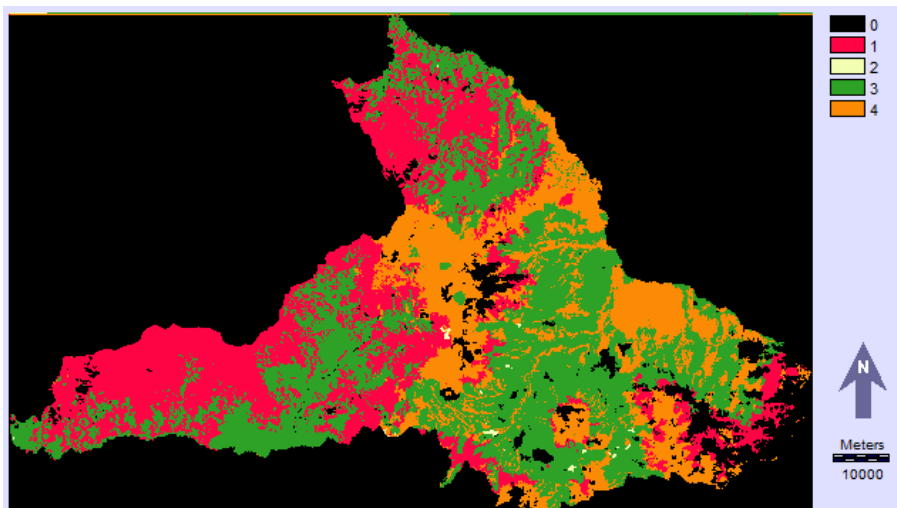
1) bosques, 2) área antrópica, 3) áreas agrícolas, 4) vegetación arbustiva y herbácea
Fuente: Elaboración personal en base a cartografía del MAE (2016)

A partir del procesamiento de la cartografía generada por el Ministerio de Medio Ambiente del Ecuador no solo se pueden cuantificar los diferentes usos para los períodos 1999-2000-2008, sino que a partir de un sistema de información geográfica se puede proyectar los usos a futuro, en ese caso el año 2020.

La tabulación cruzada (Tabla 2) permite observar la comparación de la imagen "real" de 2008 -columna- y la proyectada para ese mismo año (Figura 3) -fila- la cantidad de píxeles de los usos que ha permanecido igual en ambas imágenes (diagonal) y los píxeles que se han convertido a otros usos.

Por ejemplo, la imagen real de 2008 tiene 1241981 píxeles para el área boscosa que coinciden con el mismo uso para la imagen proyectada. Sin embargo, 277452 píxeles que figuraban en el uso forestal en la imagen real, en la proyectada se ubicaban dentro del uso agrícola. También se obtuvo un mapa que permite realizar una interpretación visual de la tabla 2 (Figura 4). Es decir que permite ver aquellos píxeles de cada categoría de uso que se mantuvieron igual en los dos mapas utilizados y, reconocer, a la vez, aquellos píxeles que cambiaron en el proceso, considerando todas las combinaciones posibles de acuerdo a las cuatro categorías utilizadas.

Figura 3 - Proyección para el año 2008 en base a mapas de 1990 y 2000.



1) bosques, 2) área antrópica, 3) áreas agrícolas, 4) vegetación arbustiva y herbácea
Fuente: Elaboración personal (2016)

Tabla 2 - Tabulación cruzada entre la imagen "real" de 2008 y la proyectada

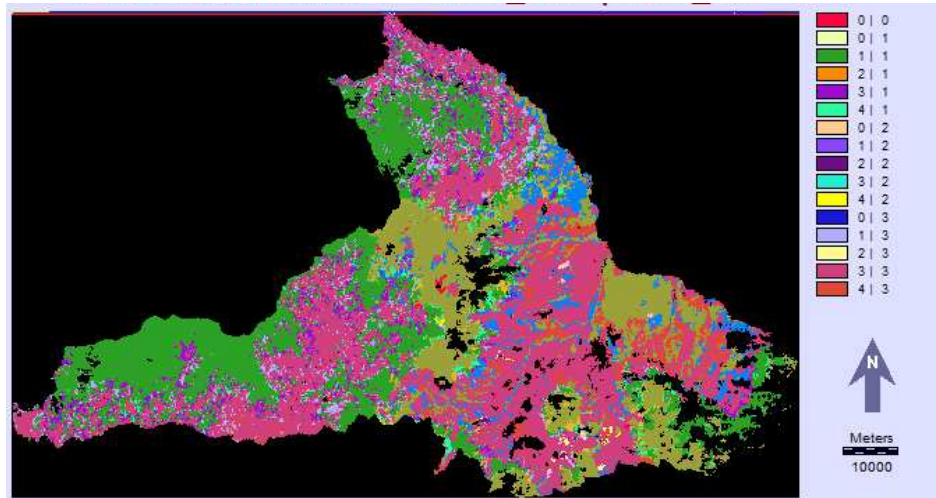
Uso	1 - bosques	2 - área antrópica	3 - áreas agrícolas	4 - vegetación arbustiva y herbácea	Total
1 - bosques	1241981	528	277452	66612	1592220
2 - área antrópica	449	3453	1841	2250	8287
3 - áreas agrícolas	193644	7092	1523285	260019	2039507
4 - vegetación arbustiva y herbácea	53825	3941	251158	793824	1116796
Total	1492716	15020	2065867	1131316	12357650

Fuente: Elaboración personal (2016)

La comparación en términos de superficie se observa en la Tabla 3 que permite distinguir como el área boscosa aumenta en la proyección en relación a la

imagen "real", a la vez que se subestima en la proyección del área antrópica. Por otra parte, los usos restantes muestran variaciones pequeñas.

Figura 4 - Mapa de la tabulación cruzada entre la imagen “real” de 2008 y la proyectada



1) bosques, 2) área antrópica, 3) áreas agrícolas, 4) vegetación arbustiva y herbácea
Fuente: Elaboración personal (2016)

Tabla 3 - Superficie en hectáreas de los usos de suelos para la imagen “real” y proyectada

Uso	2008real	2008proy	Diferencia
1 - bosques	134091	143300	-9209
2 - área antrópica	1351	746	605
3 - áreas agrícolas	184835	183556	1279
4 - vegetación arbustiva y herbácea	101043	100512	531

Fuente: Elaboración personal (2016)

Teniendo en cuenta las limitaciones y cuestionamientos existentes en relación al índice Kappa su implementación permitió conocer el grado de coincidencia entre ambos mapas:

Índice Kappa = 0,6329

Es interesante desagregar el índice Kappa por uso:

Uso 1: 0,7504

Uso 2: 0,2287

Uso 3: 0,5539

Uso 4: 0,6184

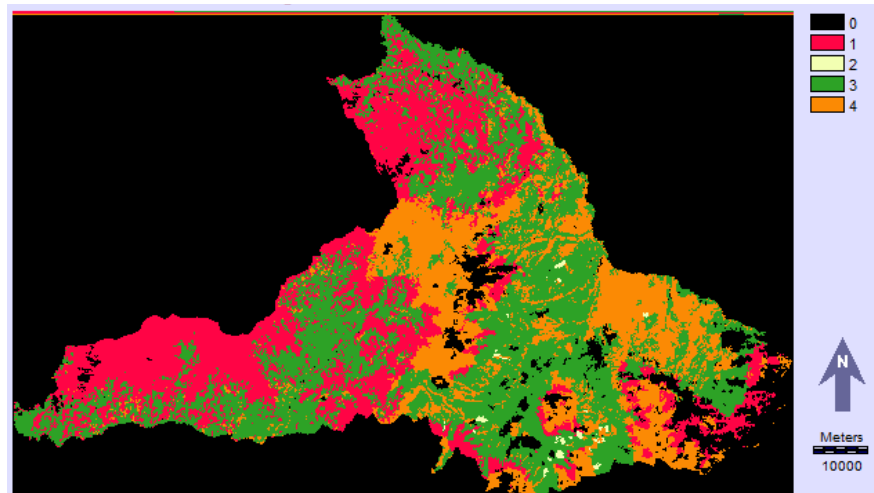
Se observa que la mayor correspondencia está en el área boscosa y la menor el área antrópica. Aunque el resultado global para el índice Kappa no es tan alto, hay que tener en cuenta que al momento de realizarse la cartografía por parte del MAE para los años 1990, 2000 y 2008 se obtuvo un índice Kappa que ronda el 0,7 para esas tres fechas. Teniendo en cuenta estas

consideraciones, el valor de 0,6329 es aceptado y se procede, entonces, a realizar la proyección al año 2020 en base a las imágenes 2000 y 2008 “real” (Figura 5).

Lo más interesante de los datos presentes en la anterior es que la proyección para el año 2020 muestra valores de superficie por uso de suelo muy similares a los registrados en el 2008 “real”. En general no muestran variaciones significativas en ninguno de los tres períodos considerados con excepción del área antrópica que es subestimada en la proyección 2008, aunque sus valores absolutos son muy bajos en relación al resto de los otros usos. Para el área boscosa, la proyección indicaría una estabilización en su superficie y una muy leve recuperación. Una situación similar se observa para las otras dos categorías consideradas en el estudio.

Para observar la evolución de las proyecciones a la tabla anterior (Tabla 3) se le agrega una nueva columna que muestra la superficie proyectada para el año 2020 (Tabla 4).

Figura 5 - Proyección de uso de suelo para el año 2020 para la provincia de Imbabura



1) bosques, 2) área antrópica, 3) áreas agrícolas, 4) vegetación arbustiva y herbácea
Fuente: Elaboración personal (2016)

Tabla 4 - Comparación de superficie en hectáreas entre 2008 “real” y proyecciones 2008 y 2020.

Uso	2008real	2008proy	2020proy
1 - bosques	134091	143300	136557
2 - área antrópica	1351	746	1415
3 - áreas agrícolas	184835	183556	189077
4 - vegetación arbustiva y herbácea	101043	100512	102762

Fuente: Elaboración personal (2016)

4 Conclusión

El proceso de deforestación presente en la República del Ecuador ha obligado al Ministerio del Ambiente de dicho país a realizar una serie de estudios para conocer la evolución de la superficie boscosa en los períodos 1990-2000 y 2008. Esta información ha servido para realizar una proyección al año 2020 a partir de un procedimiento denominado autómatas celulares. Una manera de conocer los alcances y limitaciones del procedimiento es contrastar una proyección al año 2008 (realizada en base a las ya existentes de 1990 y 2000) con la real para esa fecha. No obstante, existen reparos acerca de los métodos de validación, de manera que el mapa proyectado a 2020 debe ser considerado con cautela.

La proyección para el año 2008 muestra para el área boscosa una superficie mayor a la real, lo mismo ocurre con el área antrópica que, aunque en la proyección se observa un aumento considerable, en la realidad el incremento

fue aun mayor. Por su parte los otros dos usos registran pequeñas variaciones.

Para el año 2020, la proyección en base a los usos de 2000 y 2008 “real”, los usos muestran superficies similares a las de 2008 “real”. Los resultados indican que para Imbabura la mayor transferencia de área boscosa a áreas agrícolas ocurrió en el período 1990 – 2000. En la fase 2000 y 2008 la pérdida fue mucho menor, a la vez que la tendencia en el uso de suelo para el año 2020 muestra una leve recuperación.

Por último, es necesario destacar las potencialidades de los sistemas de información geográfica como herramientas para la planificación del territorio y del uso de suelo, aunque es necesario complementarlas con trabajo de campo que permitan validar los resultados generados mediante este tipo de programas. En este caso se destaca su utilidad en análisis de deforestación, un tema con importantes consecuencias naturales y socio-económicas en varios países latinoamericanos.

5 Land Use Change in the Province of Imbabura, Ecuador. 1990-2020

Abstract: Deforestation is one of the major environmental problems affecting Ecuador, which is why the Ministry of Environment of the country has produced land use maps for the years 1990, 2000 and 2008 to evaluate the evolution of land use changes in the province of Imbabura. These maps were input to make a projection for 2020 through a procedure known as cellular automata. It is observed that for Imbabura the largest transfer of forest area to agricultural areas occurred in the period 1990 – 2000. For the years 2000 and 2008 the loss was much lower while the trend for the year 2020 shows a slight recovery of forested area. However, there are limitations related to the validation of results that require careful consideration of the information provided by the projections.

Keywords: Land use change; Ecuador; Cellular automata; Validation.

6 Referencias

AGUAYO, M. I.; T. WIEGAND, G. D. AZÓCAR; K. WIEGAND; C. E. VEGA. Revealing the driving forces of mid-cities urban growth patterns using spatial modeling: a case study of Los Angeles, Chile, **Ecology and Society**, v. 12, n. 1, 13. Disponible en: <<http://www.ecologyandsociety.org/vol12/iss1/art13/>>. Acceso en: 10 jun.2016.

ARSANJANI, J. J.; KAINZ, W.; MOUSIVAND, A. J. Tracking dynamic land-use change using spatially explicit Markov Chain based on cellular automata: the case of Tehran. **International Journal of Image and Data Fusion**, v. 2, n. 4, p. 329-345, 2011.

BROWN, D. G.; WALKER, R.; MANSON, S.; SETO, K. Modeling land use and land cover change, En: Gutman, A.C. Janetos, C.O. Justice, E.F. Moran, J.F. Mustard, R.R. Rindfuss, D.L. Skole, B.L. Turner, and M.A. Cochrane, Eds. **Land Change Science: Observing, Monitoring and Understanding Trajectories of Change on the Earth's Surface**. Springer: New York, p. 395-409, 2004.

BUZAI, G.D. Actualización de cálculos y distribuciones espaciales a través de cadenas de Markov y autómatas celulares: Pérdida de suelos en el área metropolitana de Buenos Aires – 2001. En: Matteucci, S.D. Eds. **Panorama de la Ecología de Paisajes en Argentina y Países Sudamericanos**. Ediciones INTA: Buenos Aires, p. 433-450, 2007.

CARVALHO CANTERGIANI, C. D.; Gómez Delgado, M. Modelos basados en agentes aplicados a estudios urbanos: una aproximación teórica, **Serie Geográfica**, n. 17, p. 29 – 43, 2011.

HOUET, T.; HUBERT-MOY, L. L. Modeling and projecting land-use and land-cover changes with Cellular Automaton in considering landscape

trajectories, **EARSeL eProceedings**, v. 5, n.1, p. 63-76, 2006.

MAS, J. F.; KOLB, M.; HOUET, T.; PAEGELOW, M.; OLMEDO, M. T. C. Una comparación de programas de modelación de cambios de cobertura/uso del suelo, **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15 (SBSR)**, p. 5801-5808, 2011.

MINISTERIO DEL AMBIENTE DEL ECUADOR. Documento del programa nacional – Ecuador, **Sexta reunión de la junta normativa del programa ONU-REDD**, Da Lat, Vietnam. 2011.

MINISTERIO DEL AMBIENTE DEL ECUADOR. Línea Base de Deforestación del Ecuador Continental, Quito:Ecuador. 32 p. 2012.

MORENO, N.; WANG, F.; MARCEAU, D.J. Implementation of a dynamic neighborhood in a land-use vector-based cellular automata model, **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 33, n.1, p. 44–54, 2009.

PONTIUS JR, R. G.; HUFFAKER, D.; DENMAN, K. Useful techniques of validation for spatially explicit land-change models, **Ecological Modelling**, v. 179, n.4, p. 445-461, 2004.

PONTIUS, G. R.; MALANSON, J. Comparison of the structure and accuracy of two land change models, **International Journal of Geographical Information Science**, v. 19, n.2, p. 243-265, 2005.

PONTIUS JR, R. G.; MILLONES, M. Problems and solutions for kappa-based indices of agreement. Conference proceedings of Studying, **Modeling and Sense Making of Planet Earth**, Mytilene, Greece. 8 p. 2008.

SIERRA, R. **Patrones y factores de deforestación en el Ecuador continental, 1990-2010 y un acercamiento a los próximos 10**, Conservación Internacional Ecuador y Forest

REA – Revista de *estudios ambientales* (Online)
v.18, n. 1, p.46-56, jan./jun. 2016

Trends: Quito. 51 p. 2013.

SUN, H.; FORSYTHE, W.; WATERS, N. Modeling urban land use change and urban sprawl: Calgary, Alberta, Canada, **Networks and spatial economics**, v. 7, n.4, p. 353-376, 2007.

7 Agradecimientos

El presente trabajo fue patrocinado por el Proyecto Prometeo de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación de la República del Ecuador.