





Artículo de Investigación

Análisis multitemporal del cambio de uso del suelo en la cuenca del río Zarumilla: Proyecciones al 2040

Multi-temporal analysis of land use change in the Zarumilla river basin: Projections to 2040

Paul Sebastián Amaya Márquez¹, Brigitte Lisseth Girón Pucha¹, Jaime Enrique Maza Maza¹, Alex Luna¹

¹Carrera de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador, 1701518; bgiron3@utmachala.edu.ec; jemaza@utmachala.edu.ec; adluna@utmachala.edu.ec

*Correspondencia: pamaya2@utmachala.edu.ec

Citación: Amaya, P., Girón, B., Maza, J. & Luna, A., (2024). Análisis multitemporal del cambio de uso del suelo en la cuenca del río Zarumilla: Proyecciones al 2040. *Novasinerгия*. 7(2). 73-86.

<https://doi.org/10.37135/ns.01.14.05>

Recibido: 15 abril 2024

Aceptado: 16 junio 2024

Publicado: 03 julio 2024

Novasinerгия
ISSN: 2631-2654

Resumen: La cuenca binacional del río Zarumilla es un lugar con gran diversidad de especies y es de gran importancia para la economía de Perú y Ecuador. Estos factores socioeconómicos pueden traer consigo cambios en la distribución de las coberturas del suelo, los cuales afectan de manera negativa los ecosistemas. El presente estudio tiene como objetivo evaluar los cambios de cobertura y uso de suelo durante el periodo 1992-2022 y construir una proyección al año 2040 siguiendo las tendencias de uso actuales y su patrón histórico. Se usaron mapas de cobertura y uso de suelo de los años 1992 y 2022, así como información georreferenciada que fue usada para encontrar los factores condicionantes para el cambio de suelo. El modelo de prospección se basó en la implementación de cadenas de Markov y autómatas celulares usando factores condicionantes para construir una proyección más precisa. Los resultados obtenidos reflejan una pérdida neta de 11378 hectáreas de bosque durante el periodo 1992-2022, ocurriendo el 87.7% de esta pérdida en el lado ecuatoriano de la cuenca. A este ritmo se puede prospectar una pérdida de bosque de 10552 hectáreas para el periodo 2022-2040, de igual manera prevista principalmente en el lado ecuatoriano. El modelo prospectivo también resalta que los principales cambios se producirán en áreas de baja altitud y en proximidad a fuentes hídricas y carreteras. Esta es una pérdida alarmante de bosque nativo, la cual se puede evitar mediante la creación de políticas de desarrollo sostenible y programas de ordenamiento territorial.

Palabras clave: Cuenca, Deforestación, Prospección, Río, Uso de la tierra.

Abstract: The binational basin of the Zarumilla River is a place with great species diversity and is particularly important to the economy of Peru and Ecuador. These socioeconomic factors can lead to changes in land cover distribution, which negatively affect ecosystems. The present study aims to evaluate changes in land cover and use during the period 1992-2022 and to generate a projection for the year 2040 following current usage trends and historical patterns. Land cover and use maps from 1992 and 2022 were used, along with georeferenced information that was employed to identify the conditioning factors for land change. The prospection model was based on the implementation of Markov chains and cellular automata using conditioning factors to build a more accurate projection. The results obtained reflect a net loss of 11378 hectares of forest during the period 1992-2022, with 87.7% of this loss occurring on the Ecuadorian side of the watershed. At this rate, a forest loss of 10552 hectares can be projected for the period 2022-2040, similarly projected mainly on the Ecuadorian side. The projection model also highlights that the main changes will occur in low-altitude areas and in proximity to water sources and roads. This is an alarming loss of native forest, which can be avoided through the creation of sustainable development policies and land-use planning programs.

Keywords: Basin, Deforestation, Prospection, River, Land-use.



Copyright: 2024 derechos otorgados por los autores a Novasinerгия.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de una licencia de Creative Commons Attribution (CC BY NC).
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introducción

La cuenca del río Zarumilla es una cuenca binacional en la frontera de Ecuador y Perú, nace en los andes occidentales y recorre 62.2 km a través de la frontera entre ambos países para desembocar en el golfo de Guayaquil. Cerca de las orillas del río existen grandes extensiones de cultivos de arroz y plátano, los cuales se riegan con agua subterránea extraída de pozos excavados en los márgenes del río (INAHMI, 2005).

Los cambios en la cobertura del uso del suelo son el fenómeno más común en diferentes regiones del mundo (Vadrevu y Ohara, 2020), estos ocurren cuando hay crecimiento económico y poblacional, mala administración y políticas sobre el suelo. Esto conduce a problemas como cambios en el ciclo biogeoquímico, deforestación y cambios en la energía superficial. A través de una evolución continua durante el último medio siglo, los SIG y la teledetección han demostrado sus beneficios potenciales para muchas disciplinas relacionadas (Chen et al., 2017).

Satisfacer la demanda mundial de alimentos ha impulsado la expansión de las fronteras (Ferrerías et al., 2015). Se estima que alrededor del 25% de las tierras cultivables del planeta presentan algún signo de erosión y/o degradación, identificando como causas principales al empleo de prácticas de manejo inadecuadas (Azqueta Oyarzun et al., 2007). Todos estos factores tienen potenciales consecuencias para la calidad del agua, la biodiversidad y la capacidad de los ecosistemas para proporcionar servicios ecosistémicos esenciales. Durante los últimos años, la cuenca del río Zarumilla ha experimentado notables cambios como resultado de diversas presiones antrópicas y naturales. La principal afectación antropogénica en este lugar es la deforestación, la cual acelera los procesos erosivos y altera los ciclos hidrológicos, pudiendo causar inundaciones y deterioro del ecosistema (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, 2016).

Esta predicción se realizó siguiendo un escenario BAU (Business as usual, lo de siempre) en el cual se mantienen las tendencias actuales de desarrollo socioeconómico y se espera que la expansión urbanística y agrícola siga el patrón histórico (Gebresellase et al., 2023). En consecuencia, es necesario hacer un análisis exhaustivo a los patrones de cambio en la cuenca, el cual proporciona una base sólida para un modelo predictivo que incorpore factores que pueden impulsar o limitar el cambio. Usando el enfoque de análisis multicriterio, se pueden usar distintas características físicas y de accesibilidad dentro de la cuenca para permitir una estimación más precisa de los escenarios futuros.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar el cambio en la cobertura y uso de suelo de la cuenca del río Zarumilla para crear un modelo prospectivo basado en un análisis multicriterio usando sistemas de información geográfica, bases de datos georreferenciadas e información satelital.

2. Metodología

La metodología presentada es sistemática (ver Figura 1) empezando por el planteamiento del problema y la selección del área de estudio, seguido del proceso de selección de datos georreferenciados de fuentes reconocidas. A partir de estos datos se elaboró un análisis del

cambio de cobertura del periodo 1992-2022, el cual ayudó a crear el modelo de proyección mediante la implementación de cadenas de Markov y autómatas celulares. Se realizó una validación del modelo propuesto mediante una matriz de confusión y el cálculo del índice Kappa, un índice mayor a 0.61 indica un modelo substancial lo que permitió realizar un análisis estadístico para estimar de manera más precisa el escenario futuro del año 2040.

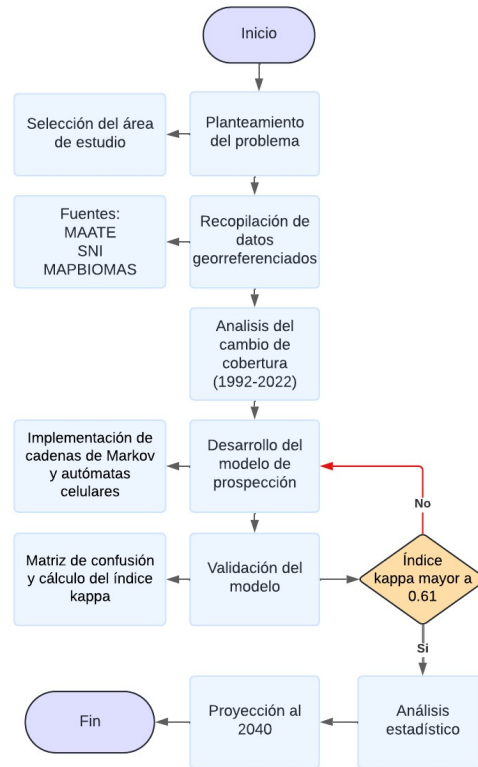


Figura 1: Diagrama de flujo de la metodología utilizada

2.1. Área de estudio

El presente estudio se llevó a cabo en la cuenca binacional del río Zarumilla (ver Figura 2). Esta tiene un área total de 890.56 km², encontrándose repartido entre las repúblicas del Perú y Ecuador en porcentajes de 45% y 55% respectivamente. El clima del área de estudio varía desde desértico en la zona costera al semiárido de las zonas montañosas en la parte fronteriza y el bosque húmedo en las nacientes de la cuenca. La mayor parte de la cuenca es árida y semiárida con precipitaciones anuales menores de 600 mm por año (Autoridad Nacional del Agua, 2020).

Esta cuenca consta de 2 áreas protegidas: la Reserva Ecológica Arenillas (Ecuador) y el parque nacional de Cerros de Amotape (Perú).

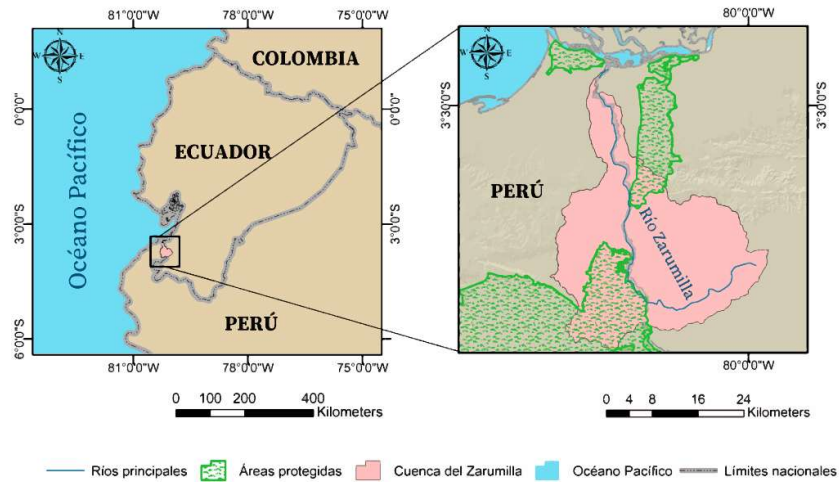


Figura 2: Mapa del área de estudio

2.2. *Periodos académicos de análisis*

Se realizó la recopilación de información georreferenciada de diferentes períodos temporales. Esta información fue adquirida de fuentes reconocidas, como el Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica (MAATE), el Sistema Nacional de Información (SNI) y el proyecto MapBiomás, el cual es una iniciativa conformada por una red colaborativa de especialistas en mapeo de coberturas y uso del suelo con sensores remotos. Todos los mapas anuales de cobertura y uso del suelo de MapBiomás fueron producidos a partir de la clasificación píxel a píxel de imágenes del satélite Landsat. Todo el proceso fue realizado con algoritmos de machine learning a través de la plataforma Google Earth Engine (MapBiomás Ecuador, 2023). Los principales factores o variables independientes tomados en cuenta para la prospección (ver Figura 3) fueron: Pendientes, distancia euclidiana a poblaciones y sitios, distancia euclidiana a ríos y quebradas, distancia euclidiana a vías y accesos, modelo digital de elevación (DEM) y áreas protegidas-parques nacionales.

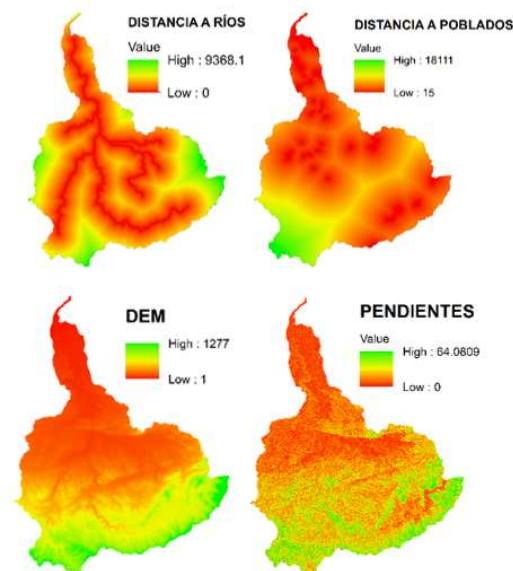


Figura 3: Variables independientes

Después de recopilar estos datos se procedió a recortarlos y reclasificarlos usando 5 clases definidas por el IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) las cuales son: Bosque, vegetación arbustiva y herbácea, tierra agropecuaria, zona antrópica y cuerpos de agua. Una vez recopilados y procesados estos datos se pudo generar una evaluación detallada de la evolución de la cobertura del suelo en la cuenca a lo largo del tiempo. Usando las clasificaciones de 1992 y 2022 se hizo una tabla de comparación de superficie y porcentajes, además se realizaron 2 mapas con el fin de mejorar la visualización de los hallazgos.

2.3. Modelo prospectivo

Este se basa en la implementación de un modelo de cadenas de Markov, el cual generó una matriz de probabilidades de cambio entre las diferentes categorías de uso del suelo a lo largo del tiempo. Posteriormente se empleó un modelo de autómatas celulares para simular el cambio de uso del suelo en múltiples iteraciones, representando así los años futuros hasta el 2030 (Ramos-Reyes et al., 2021). En este modelo se integra la matriz de probabilidad de cambios previamente elaborada para crear un mapeo perfecto de la distribución espacial. Se realizaron 18 iteraciones del modelo CA-MARKOV. En cada iteración, los píxeles con la mayor probabilidad de transición y la mayor idoneidad para un tipo de cobertura en particular se cambiaron a un nuevo tipo de cobertura (Wang et al., 2019).

2.4. Validación del modelo

Se seleccionó el año 2012 como punto intermedio y se compararon las predicciones del modelo con los datos reales proporcionados por el Ministerio del Ambiente. Esta comparación se llevó a cabo mediante una matriz de confusión, que muestra el número de predicciones correctas e incorrectas para cada categoría de uso del suelo. La evaluación de la precisión del modelo se realizó mediante el cálculo del índice kappa (ver Tabla 1), donde la precisión es valorada en términos de la cantidad y ubicación de celdas clasificadas correctamente (Keshtkar y Voigt, 2016).

Tabla 1: Fuerza relativa de concordancia kappa

Coeficiente kappa	Fuerza de concordancia
<0.00	Pobre
0.00-0.20	Leve
0.21-0.40	Regular
0.41-0.60	Moderado
0.61-0.80	Substancial
0.81-1.00	Casi perfecto

Fuente: (Landis y Koch, 1977)

2.5. Análisis estadístico

Se realizó una prueba de regresión logística y una prueba perceptrón multi-capas (PML), la cual es un algoritmo de red neuronal que aprende las relaciones entre datos lineales y no lineales (Bento, 2021). La regresión logística se utilizó debido a su capacidad para modelar la probabilidad de que ocurra deforestación en función de las variables

independientes. Por otro lado, la prueba PML fue usada para ofrecer una visión más profunda de las relaciones lineales y no lineales entre las variables, de esta manera capturando los patrones existentes en los datos. Estas pruebas se usaron para calcular cuales serían los factores más condicionantes para el cambio a tierras agrícolas de la cobertura vegetal nativa, evaluando de forma más completa los factores impulsores de los cambios de uso de suelo.

3. Resultados

3.1. Análisis de cambios entre 1992 y 2022

Mediante el desarrollo del mapa y análisis del cambio de cobertura del suelo de la cuenca del Zarumilla, durante los periodos 1992-2022 se ha logrado determinar en la Figura 3 la evolución que ha tenido la cobertura del suelo durante 30 años. En la Tabla 2 se observan los tipos de cambios que ocurrieron en el periodo establecido debido a las diferentes actividades desarrolladas en la zona de estudio, cubriendo el área y porcentaje de cada sector. En primer lugar, se encuentra la categoría Bosque, la cual contaba con 67706.8 ha en 1992 y disminuyó a 56321 ha en el año 2022, lo que representa una pérdida de al menos el 16.80%. Las zonas de vegetación herbácea y arbustiva tuvieron 66 hectáreas de pérdida neta, siendo la categoría menos afectada.

Tabla 2: Uso del suelo por su superficie y porcentaje en el periodo 1992-2022

Categorías	1992 (ha)	2022 (ha)	Pérdidas (ha)	Ganancias (ha)	Cambio neto (ha)	Tasa de cambio (%)
B	67706.8	56321.0	-16251	4873	-11378	-16.80%
VAH	96.7	29.9	-93	27	-66	-68.24%
TA	16722.0	27567.2	-5313	16153	10840	64.82%
ZA	850.6	1283.5	-404	836	432	50.79%
CA	230.6	403.2	-106	279	173	75.03%

B= Bosque; VAH=Vegetación arbustiva y herbácea; TA=Tierra agropecuaria; ZA=Zona antrópica; CA=Cuerpos de agua

Otro de los cambios más notables ocurrió en las zonas antrópicas, debido al crecimiento poblacional pasaron de 850.6 a 1283.5 ha en este periodo. En la Figura 4 se puede observar grandes cambios en la cobertura, con la pérdida de zonas naturales reemplazadas por tierras agrícolas. Con estos datos se observa que la cuenca del río Zarumilla experimentó una gran expansión agrícola durante los últimos años. Los cultivos y plantaciones son el medio de vida de los habitantes de este lugar, y esta expansión de la frontera agrícola ha provocado la pérdida de bosques.

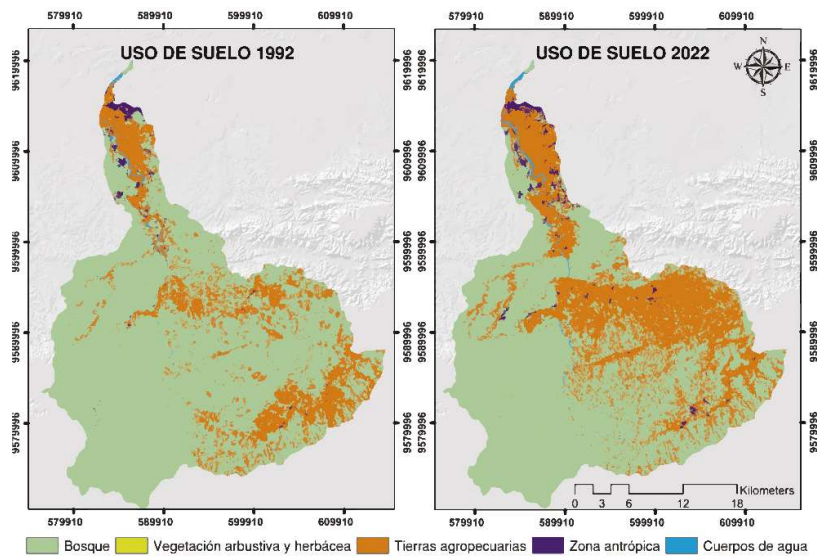


Figura 4: Coberturas y usos de suelo de la cuenca del río Zarumilla de los años 1992 y 2022

Como se observa en la Figura 5 los principales cambios que se dieron en los últimos 22 años fueron principalmente para tierras agrícolas, con 16107 ha de nuevos suelos destinados a cultivo y ganadería. A sí mismo se puede observar un leve aumento en la vegetación que se encuentra en la parte sur de la cuenca, aun así, este aumento es muy ligero en comparación a la pérdida de bosque que se ha dado.

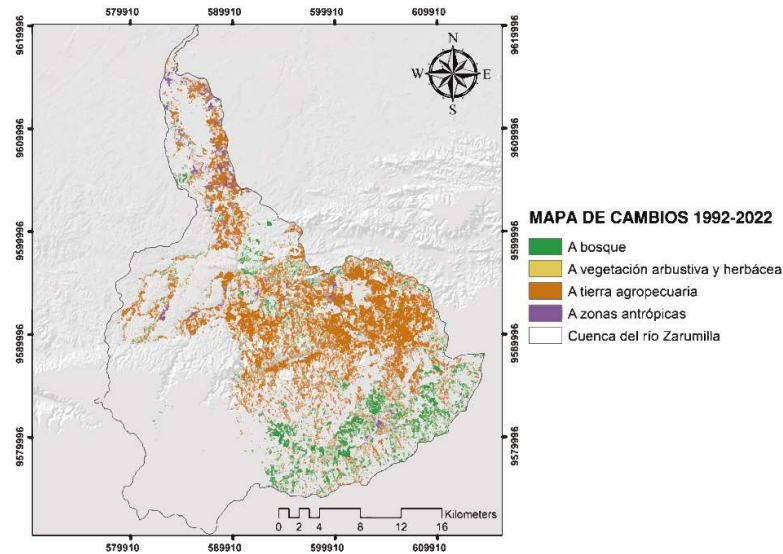


Figura 5: Cambios de usos de suelo del río Zarumilla

La Figura 5 indica de manera detallada los sectores donde se produjeron los cambios. La conversión de otros usos de suelo a tierras agropecuarias se dio de manera extensa en gran parte de la cuenca en este periodo exceptuando ciertos sectores en el sur donde se registró una leve recuperación del bosque. Todos estos cambios han ocurrido principalmente en el lado ecuatoriano de la cuenca, teniendo un 87.5% de los cambios totales con 19314 de las 22060 ha. La ausencia de cambios en la cobertura de suelo en el lado peruano se ha dado principalmente por la presencia del parque nacional Cerros de Amotape y su zona de

amortiguamiento, la cual cuenta con 14635 ha en el área de la cuenca. En este parque se protege la integridad ecológica de uno o más ecosistemas, las asociaciones de la flora y fauna silvestre y otras características paisajísticas y culturales asociadas (Instituto Nacional de Recursos Naturales, 2001).

3.2. Probabilidad de transición

El análisis del mapa de potencial de transición (ver Figura 6) muestra la probabilidad de cambio en una escala de 0 a 1, donde 0 es una probabilidad nula y 1 la probabilidad más alta. Se observa que las zonas con mayores probabilidades de expansión agrícola a expensas de bosque se encuentran cerca de las riberas de los ríos y de asentamientos humanos. Las zonas con menor probabilidad de cambio se encuentran en la parte sur de la cuenca, donde la altitud es mayor y las pendientes son más escarpadas.

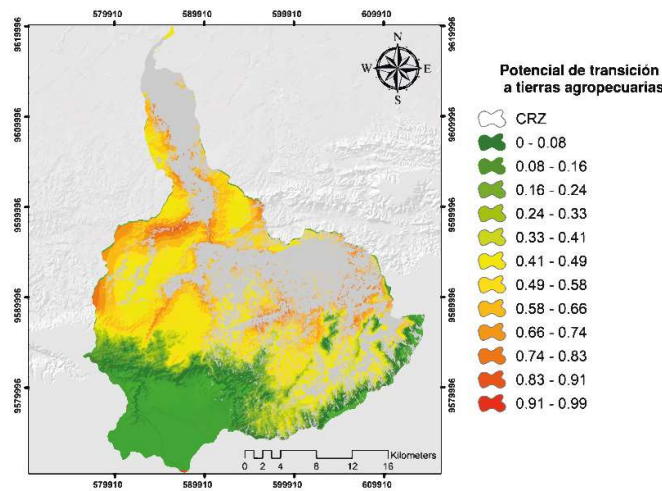


Figura 6: Mapa de potencial de transición a tierras agropecuarias

3.3. Validación del modelo

En la prueba de concordancia entre la cobertura del 2012 simulada y la cobertura real se obtuvo un índice Kappa de 0.62 (ver Figura 7).

Kstandard	= 0.6256
Kno	= 0.7750
Klocation	= 0.7908
KlocationStrata	= 0.7908

Figura 7: Resultados de la prueba de concordancia Kappa

3.4. Proyección al 2040

En la proyección al año 2040, se estima una pérdida neta de 10562 ha de bosque y una ganancia de 10152 ha para tierras agropecuarias. En este periodo también se prevé un

aumento de 1179 ha de zonas antrópicas, las cuales no impactarían directamente el bosque si no que desplazarían aproximadamente 1032 ha de tierras de cultivo.

Tabla 3: Cobertura y uso de suelo del periodo 2022 - 2040

Categorías	2022 (ha)	2040 (ha)	Pérdidas (ha)	Ganancias (ha)	Cambio neto (ha)	Tasa de cambio (%)
B	56321.0	45803	-10589	27	-10562	-16.80%
VAH	29.9	42	-13	26	13	-68.24%
TA	27567.2	36655	-1032	10152	9120	64.82%
ZA	1283.5	2398	-57	1179	1122	50.79%
CA	403.2	708	-1	220	219	75.03%

Aunque el crecimiento urbano en esta región no sea desorbitado, igual existe un ligero aumento principalmente en la zona de Huaquillas y en las riberas del río Zarumilla (ver Figura 8). Se esperan 9120 hectáreas de ganancias netas para tierras agropecuarias, lo cual supone un aumento del 64.82%. En esta proyección se aprecia el papel crucial de las áreas protegidas en el control de la deforestación.

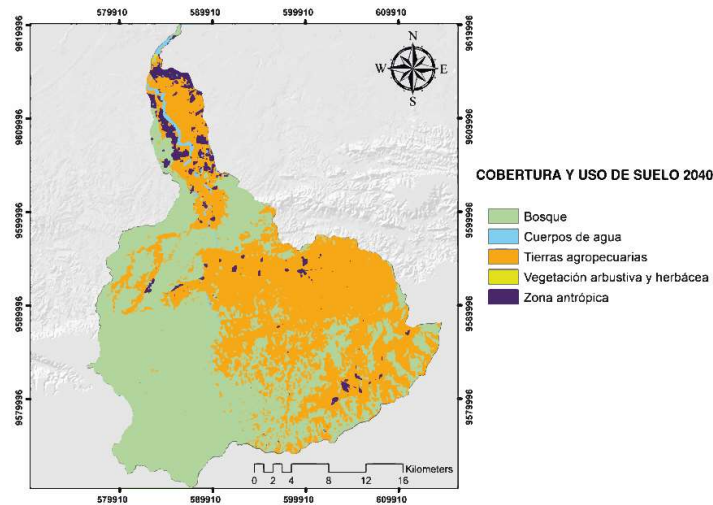


Figura 8: Cobertura y uso de suelo del año 2040

Usando regresión lineal entre la variable dependiente (expansión agrícola) y las variables independientes (factores condicionantes) (Tabla 4) se analizaron las relaciones y los patrones existentes. Los factores cuentan con un coeficiente negativo el cual indica que, a mayor intensidad del factor, menor será el cambio subsecuente. Los resultados obtenidos proporcionan una visión integral del cambio de uso del suelo y su evolución futura hasta el año 2040. Esta información es de gran importancia para la planificación del uso del suelo y la gestión ambiental, ya que permite anticipar y tomar medidas preventivas frente a posibles cambios paisajísticos.

Tabla 4: Regresión logística para el cambio a tierras agrícolas

Coefficiente de regresión individual	
Intercepto/Variables	Coefficiente
Intercepto	-0.1933
Distancia a vías y accesos	-0.00003
Distancia a poblados	-0.0002
Elevación	-0.0004
Pendientes	-0.000008
Distancia a ríos	-0.0001

4. Discusión

4.1. *Análisis de cambios entre 1992 y 2022*

Los hallazgos de la investigación evidenciaron cómo ha evolucionado la cobertura del suelo en la cuenca del río Zarumilla, así como los factores que han contribuido a la pérdida de cobertura vegetal tanto en áreas protegidas y no protegidas. Durante cada periodo de estudio, se observó una notable variabilidad en los cambios en el uso del suelo, especialmente en las áreas cubiertas por bosques y tierras destinadas a actividades agropecuarias. Álvarez del Castillo y Agredo Cardona (2013), declaran que los factores que se pueden señalar como los causantes de la pérdida en la cobertura vegetal son la carencia de una planificación que integra los procesos político administrativos, ecosistémicas y ambientales, migración o desplazamiento, escasez de suelo urbanizable, aumento poblacional, topografía con altas pendientes, desarrollos urbanísticos espontáneos no planificados y los regímenes de lluvias que superan los niveles pluviométricos normales. Según Pabón Salazar (2022) el principal problema de cambios de cobertura y usos de suelo es la pérdida paulatina de la cobertura vegetal, debido a la ampliación de la frontera agrícola, siendo el banano, plátano, limón y cacao los principales cultivos permanentes de este sector.

4.2. *Prospección de uso de suelo*

La elevación es uno de los factores claves para el cambio de uso de suelo, en la cuenca se puede visualizar que entre mayor sea la altitud menor va a ser la deforestación, esto debido a que en esta ubicación suele preferirse las zonas más bajas y cercanas a los ríos para la creación de tierras agrícolas. La distancia a poblados, la distancia a vías y accesos y la distancia a ríos son los siguientes factores condicionantes, al contar con un coeficiente negativo estos indican que la falta de acceso a estos lugares condiciona la expansión de la agricultura. Así mismo otro factor clave para la deforestación son las pendientes del lugar, entre más escarpadas son las pendientes de un sitio menos probabilidad de cambio tienen. En el mapa de potencial de transición podemos notar que a pesar de que las áreas protegidas y parques nacionales no se encuentran excluidas en este modelo, se observa que gran parte del parque nacional Cerros de Amotape tiene muy pocas probabilidades de convertirse a otro uso de suelo debido a la falta de acceso al lugar, lo cual nos indica que es un lugar que

se ha mantenido prácticamente inalterado y libre de presencia humana a lo largo del tiempo de estudio.

4.3. *Validación del modelo*

En la prueba kappa del modelo se obtuvo un coeficiente de 0.62. Según (Landis y Koch, 1977) un rango kappa que se encuentra entre 0.61 y 0.80 indica una concordancia substancial. (Pontius, 2000) también indica que un coeficiente kappa mayor a 0.5 es suficiente para validar un modelo de predicción de cambio de uso de suelo.

5. **Conclusiones**

Mediante el análisis de los cambios durante el periodo 1992-2022 se logró observar que gran parte de las pérdidas se produjeron principalmente en el lado ecuatoriano de la cuenca donde ocurrió el 87.7% de la deforestación total. Esto indica que de las 16251 ha de bosque perdido en toda la cuenca, 14252 ha se perdieron solamente en el lado ecuatoriano. El lado peruano se ha mantenido relativamente poco alterado a lo largo de los años principalmente por la existencia del parque nacional Cerros de Amotape y su respectiva zona de amortiguamiento. Mediante la aplicación de regresión lineal se pudo observar la relación existente entre la distancia a ríos, vías y accesos y la elevación en los cambios de suelo en el sector, siendo estos los principales factores que condicionan la expansión agrícola en la zona. De acuerdo con la proyección al año 2040 se puede esperar una alarmante expansión en la deforestación que podría llegar a 10589 hectáreas de bosque, especialmente en el lado ecuatoriano. Se recomienda implementar políticas de desarrollo sostenible, promover prácticas agrícolas sostenibles, ampliar y reforzar las áreas protegidas para la conservación de la biodiversidad y ejecutar programas de reforestación, así mismo se puede involucrar a las comunidades locales en la conservación de los recursos naturales, ofreciendo soluciones inclusivas y sostenibles a largo plazo.

Contribuciones de los autores

En concordancia con la taxonomía establecida internacionalmente para la asignación de créditos a autores de artículos científicos (<https://casrai.org/credit/>). Los autores declaran sus contribuciones en la siguiente matriz:

	Amaya, P.	Girón, B.	Maza, J.	Luna, A.
Conceptualización				
Análisis formal				
Investigación				
Metodología				
Recursos				
Validación				
Redacción – revisión y edición				

Conflicto de Interés

No existen conflictos de interés de naturaleza alguna.

Referencias

- Álvarez del Castillo, J., y Agredo Cardona, G. (2013). Pérdida de la cobertura vegetal y de oxígeno en la media montaña del trópico andino, caso cuenca urbana San Luis (Manizales). *Luna Azul*, (37), 30-48. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-24742013000200004
- Autoridad Nacional del Agua. (2020). *Plan de gestión integrada de los recursos hídricos de la cuenca hidrográfica transfronteriza del río Zarumilla*. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/ANAI_4e4ca575a721690bf3b8efceec84af0b
- Bento, C. (21 de septiembre de 2021). *Multilayer Perceptron Explained with a Real-Life Example and Python Code: Sentiment Analysis*. <https://towardsdatascience.com/multilayer-perceptron-explained-with-a-real-life-example-and-python-code-sentiment-analysis-cb408ee93141>
- Chen, M., Lin, H., y Lu, G. (2017). Virtual Geographic Environments. *International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology*. <https://doi.org/10.1002/9781118786352.wbieg0448>
- Azqueta Oyarzun, D., Alviar Ramírez, M., Dominguez Villalobos, L., y O'ryan, R. (2007). *Introducción a la economía ambiental*. McGraw-Hill Interamericana de España. https://www.academia.edu/38621803/Introducci%C3%B3n_a_la_econom%C3%ADa_ambiental
- Intituto Nacional de Meteorología e Hidrología – INAHMI. (2005) *Estudio hidrológico de caudales máximos y levantamiento de información ambiental de la cuenca del río Zarumilla* [Archivo PDF]. <https://issuu.com/inamhi/docs/estudiozarumilla>
- Ferreras, L. A., Toresani, S. M. I., Faggioli, V. S., y Galarza, C. M. (2015). Sensibilidad de indicadores biológicos edáficos en un Argiudol de la Región Pampeana Argentina. *Sociedad Española de la Ciencia del Suelo*, 5(3), 220-235. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2015.V5.N3.04>

- Gebresellase, S. H., Wu, Z., Xu, H., y Muhammad, W. I. (2023). Scenario-Based LULC Dynamics Projection Using the CA–Markov Model on Upper Awash Basin (UAB), Ethiopia. *Sustainability*, 15(2), 1683. <https://doi.org/10.3390/su15021683>
- Keshtkar, H., y Voigt, W. (2016). Potential impacts of climate and landscape fragmentation changes on plant distributions: Coupling multi-temporal satellite imagery with GIS-based cellular automata model. *Ecological Informatics*, 32, 145–155. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2016.02.002>
- Landis, J. R., y Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33(1), 159–174. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- MapBiomás Ecuador. (2023). *Proyecto*. <https://ecuador.mapbiomas.org/proyecto/>
- Pabón Salazar, E. D. (2022). *Análisis de los procesos de cambio de uso y cobertura del suelo en la microcuenca del río Tabacay*. [Tesis de maestría, Universidad Andina Simón Bolívar] <https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/8687/1/T3801-MCCSD-Pabon-Analisis.pdf>
- Instituto Nacional de Recursos Naturales-INRENA. (2001). *Plan maestro del Parque Nacional Cerros de Amotape* [Archivo PDF]. <https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/sinia/archivos/public/docs/304.pdf>
- Pontius, R. G. (2000). Quantification Error Versus Location Error in Comparison of Categorical Maps. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(8), 1011-1016. https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/2000journal/august/2000_aug_1011-1016.pdf
- Ramos-Reyes, R., Palomeque-De la Cruz, M. Á., Megia-Vera, H. J., y Pascual-Landeros, D. (2021). Modelo del cambio de uso de suelo en el sistema lagunar Carmen-Pajonal-Machona, México. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 39. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.587>
- Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. (2016). *Términos de referencia para la elaboración del plan de gestión integrada de los recursos hídricos de la cuenca hidrográfica transfronteriza del río Zarumilla* [Archivo PDF]. <https://planbinacional.org.ec/wp-content/uploads/2016/08/terminos-de-referencia-finales-girh-zarumilla-09-08-2016.pdf>.

Vadrevu, K. P., y Ohara, T. (2020). Focus on land use cover changes and environmental impacts in South/Southeast Asia. *Environmental Research Letters*, 15(10), 100201. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb5cb>

Wang, M., Cai, L., Xu, H., y Zhao, S. (2019). Predicting land use changes in northern China using logistic regression, cellular automata, and a Markov model. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(24). <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4985-9>