

Spectral vegetation indices and Markov chain to evaluate the loss of forest cover in the Allpahuayo Mishana National Reserve, in the period 2002 – 2021

Tiffany Valeria Cruz Cespedes, Egresada en la Carrera de Ingeniería Ambiental¹, Solange Margot Gamboa Alvarez, Egresada en la Carrera de Ingeniería Ambiental¹, Jessica Marleny Luján Rojas, Magister² y Grant Ilich Llaque Fernández, Magister³

¹ Universidad Privada del Norte, Perú, tcruzcespedes@gmail.com, gamboasolange6@gmail.com

² Universidad Privada del Norte, Perú, jessica.lujan@upn.pe

³ Universidad Privada del Norte, Perú, grant.llaque@upn.pe

Abstract— The present study identifies the pattern of forest cover change in the period 2002-2021, using vegetation indices and Markov Chain in the Allpahuayo Mishana National Reserve, Loreto, Peru, to predict the behavior of land uses to the year 2030. The research was descriptive, with a non-experimental design. To do this, the vegetation index of Landsat 7 Enhanced thematic mapper plus (ETM+) and Landsat 8 Operational land images (OLI) were used to evaluate the loss of forest cover for the years 2002 and 2021. Likewise, the Markov chain allowed to predict forest cover by the year 2030. The forecast results reveal that bare soil, water bodies, dense forest cover, and sparse forest cover will increase by 1%, 2%, 8%, and 89%, respectively, in accordance with Markov chain statistics. This indicates that the Allpahuayo Mishana National Reserve could experience deforestation and expansion of agricultural activities. Therefore, there is an increased need to integrate participatory approaches, develop activities for the protection and recovery of the Natural Reserves of the Peruvian Amazon based on current environmental legislation and policy. In conclusion, this research generates both methodological and technological contributions in the field of research.

Keywords—Forests, National Reserve, Land use, Amazon.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.290>

ISBN: 978-628-95207-0-5 **ISSN:** 2414-6390

Spectral vegetation indices and Markov chain to evaluate the loss of forest cover in the Allpahuayo Mishana National Reserve, in the period 2002 – 2021

Índices de vegetación espectral y cadena de Markov para evaluar la pérdida de cobertura forestal en la Reserva Nacional Allpahuayo Mishana, en el período 2002 – 2021

Tiffany Valeria Cruz Cespedes, Egresada en la Carrera de Ingeniería Ambiental¹, Solange Margot Gamboa Alvarez, Egresada en la Carrera de Ingeniería Ambiental¹, Jessica Marleny Luján Rojas, Magister² y Grant Ilich Llaque Fernández, Magister³

¹ Universidad Privada del Norte, Perú, tcruzcespedes@gmail.com, gamboasolange6@gmail.com

² Universidad Privada del Norte, Perú, jessica.lujan@upn.pe

³ Universidad Privada del Norte, Perú, grant.llaque@upn.pe

Resumen— El presente estudio identifica el patrón de cambio de cobertura forestal en el periodo 2002 – 2021, utilizando índices de vegetación y Cadena de Markov en la Reserva Nacional Allpahuayo Mishana, Loreto, Perú, para predecir el comportamiento de los usos de suelo al año 2030. La investigación fue de tipo descriptivo, con un diseño no experimental. Para ello, se utilizaron el índice de vegetación de Landsat 7 Enhanced thematic mapper plus (ETM+) y Landsat 8 Operational land images (OLI) para evaluar la pérdida de cobertura forestal para los años 2002 y 2021. Asimismo, la cadena de Markov permitió predecir la cobertura forestal para el año 2030. Los resultados de la predicción revelan que el suelo desnudo, cuerpos de agua, cobertura forestal densa, y cobertura forestal poco densa aumentarían en un 1%, 2%, 8% y 89% respectivamente de acuerdo con las estadísticas de la cadena de Markov. Esto indica que la Reserva Nacional Allpahuayo Mishana podría experimentar deforestación y expansión de las actividades agrícolas. Por lo tanto, aumenta la necesidad de integrar enfoques participativos, desarrollar actividades de protección y recuperación de las Reservas Naturales de la Amazonía Peruana en base a la legislación y política ambiental vigente. A manera de conclusión la presente investigación genera aportes tanto metodológicos como tecnológicos en el campo de la investigación.

Palabras Clave— Bosques, Reserva nacional, Uso de suelo, Amazonía.

Abstract— The present study identifies the pattern of forest cover change in the period 2002-2021, using vegetation indices and Markov Chain in the Allpahuayo Mishana National Reserve, Loreto, Peru, to predict the behavior of land uses to the year 2030. The research was descriptive, with a non-experimental design. To do this, the vegetation index of Landsat 7 Enhanced thematic mapper plus (ETM+) and Landsat 8 Operational land images (OLI) were used to evaluate the loss of forest cover for the years 2002 and 2021. Likewise, the Markov chain allowed to predict forest cover by the year 2030. The forecast results reveal that bare soil, water bodies, dense forest cover, and sparse forest cover will increase by 1%, 2%, 8%, and 89%, respectively, in accordance with Markov chain statistics. This indicates that the Allpahuayo Mishana National Reserve could experience deforestation and expansion of agricultural activities. Therefore, there is an increased need to integrate participatory approaches, develop activities for the protection and recovery of the Natural Reserves of the Peruvian Amazon based on current environmental legislation and policy. In conclusion, this research generates both methodological and technological contributions in the field of research.

Keywords— Forests, National Reserve, Land use, Amazon.

I. INTRODUCCIÓN

Los bosques cubren el 31% de la superficie terrestre mundial, que equivale a 4 060 millones por hectáreas, pero no están uniformemente distribuidos en el planeta. Casi la mitad de la superficie forestal (el 49%) se mantiene relativamente intacta, mientras que el 9% se encuentra en

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.290>

ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

forma de fragmentos con poca o nula conectividad entre ellos. Las pluviselvas tropicales y los bosques boreales de coníferas son los menos fragmentados, mientras que los bosques secos subtropicales y los bosques templados oceánicos se encuentran entre los más fragmentados [1], [2].

A nivel mundial se ha perdido 178 millones de hectáreas de bosque entre 1990 y 2020, donde África tuvo la mayor tasa anual de pérdida neta en el período 2010-2020 con 3,9 millones de hectáreas, seguida por América del Sur, con 2,6 millones de hectáreas [3]. Cabe mencionar, que por el mal manejo de tierras y pocas prácticas de prevención de incendios en Portugal se perdió un 4% del total de su cobertura arbórea, en la República del Congo a principios del 2016 ocurrió un incendio forestal que destruyó 15.000 hectáreas de bosque, así también en Canadá se perdió más de 600.000 hectáreas de bosque [4].

En Latinoamérica, los países con mayor cantidad de bosque amazónico primario perdido durante el año 2020 fueron: Brasil, Bolivia, Perú, Colombia, Venezuela y Ecuador. Más del 65% de la deforestación de toda la Amazonía registrada en dicho año se ubicó en Brasil, el país con mayor territorio amazónico, que perdió 1,5 millones de hectáreas, un 13% más que el año anterior. En Bolivia, se superaron las 240.000 hectáreas, lo que batió el récord de 2017, principalmente por los incendios acontecidos en el sureste que arrasaron los bosques secos, conocidos como los ecosistemas Chiquitano y Chaco [5].

En Perú, se cuenta aproximadamente con 72 millones de hectáreas de bosques de gran biodiversidad; además, es el segundo país en extensión forestal en América Latina, el cuarto con mayor área de bosques tropicales y está entre los 10 países del planeta con mayor extensión de cobertura forestal [6]. Sin embargo, durante el año 2020 se perdieron 190.000 hectáreas de selva virgen, un 18% más que en 2019, lo que supone una cifra nunca antes vista, que supera el anterior récord de 2017 [7].

En la región Loreto, se conserva una particular riqueza de hábitats, debido a la gran diversidad de tipos de suelos de distinto origen, textura, estado de meteorización y contenido de nutrientes, diversidad que a su vez se encuentra vinculada con la dinámica del levantamiento de la cordillera de los Andes. Un claro ejemplo de esta gran variabilidad de ecosistemas es la Reserva Nacional Allpahuayo Mishana (RNAM), ubicada al noroeste del Perú, enteramente en el llano amazónico cerca de la ciudad de Iquitos. Diversos procesos históricos, geológicos y climáticos, que tienen influencia en la variación ambiental, incluyendo cambios de cauce de los ríos, aluviones, intrusiones marinas desde el Caribe y otros fenómenos geológicos derivados de la Placa tectónica andina, han creado en el área de la RNAM un auténtico mosaico de distintos tipos de suelos, desde arena blanca de cuarzo casi puro, hasta arcilla de origen lacustre, relativamente ricas en nutrientes [8].

Los bosques de la Reserva Nacional Allpahuayo Mishana, están sufriendo una pérdida considerable en los últimos años debido a la tala indiscriminada, prácticas ilegales de minería y extracción de arena blanca en la zona de amortiguamiento. Por consiguiente, los índices de vegetación espectral surgen como una alternativa viable para analizar los

cambios en la cobertura forestal y determinar las cifras de pérdida en menor tiempo, menor costo y una mayor precisión. Asimismo, el uso del modelo de la Cadena de Márkov sirve para predecir en el tiempo los cambios ocurridos en el área de estudio.

La dinámica de cambio de uso de la tierra (uso de suelo) espacio-temporal en modelos híbridos como CA-Markov, demuestran ser una valiosa herramienta para una mejor predicción del cambio de uso de la tierra [9]. Los investigadores [10], [11] y [12], manifiestan que las actividades que ocasionan la pérdida de cobertura boscosa son la agricultura migratoria, extracción de madera, y en mayor grado por la minería de oro, actividades que no solo destruyen los bosques, sino también ponen en peligro la permanencia de las comunidades involucradas.

En los estudios revisados se evidencia la necesidad de adoptar medidas que permitan analizar la cobertura forestal y diagnosticar su estado actual. En este sentido, una de las herramientas más útiles y efectivas son el uso de índices de vegetación espectral, que con la ayuda de imágenes satelitales permiten cuantificar y comparar con un alto grado de precisión y eficiencia, coberturas forestales en distintos periodos. Esta investigación sostiene como objetivo identificar el patrón de cambio de cobertura forestal en el periodo 2002-2021 utilizando índices de vegetación espectral y la cadena de Markov en la Reserva Nacional Allpahuayo Mishana, así como evaluar la pérdida de cobertura forestal para los años 2002 al 2021, predecir el cambio de la cobertura forestal desde el año 2002 hasta el 2030 y brindar alternativas de solución para frenar la pérdida de bosque en el área de estudio.

Finalmente, nuestra investigación está enfocada en el objetivo número quince establecido por la Organización de las Naciones Unidas que se basa en gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad.

II. METODOLOGÍA

El enfoque que se consideró para esta investigación es cuantitativo, con un diseño no experimental y el tipo de investigación fue descriptiva. La población está representada por los bosques de la región Loreto, de los cuales se seleccionó una muestra constituida por la cobertura forestal de la Reserva Nacional Allpahuayo Mishana.

La información recopilada se obtuvo del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2021), donde se descargaron datos satelitales Landsat 7 ETM+ y 8 OLI para los años 2002 y 2021 para evaluar y simular la FCC. Las imágenes satelitales descargadas fueron geo-rectificadas de acuerdo con el sistema de coordenadas 18-North UTM (Universal Transverse Mercator). Debido al error atmosférico y la variación estacional, las imágenes satelitales de Landsat se descargaron durante la estación seca; por lo tanto, garantizan que la imagen esté libre de ruido estacional, radiométrico y atmosférico.

Para la evaluación de la pérdida de cobertura forestal se utilizaron imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ y 8 OLI de los años 2002 y 2021. También se hizo uso del Índice de

vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el Índice de vegetación de diferencia normalizada verde (GNDVI). Los índices de vegetación se evaluaron de la siguiente manera: NDVI y GNDVI. El índice espectral de la vegetación se evaluó y calculó en la herramienta de matemáticas ráster utilizando el software ArcGIS 10.8. El índice de vegetación espectral se seleccionó en función de sus sensibilidades y mayor precisión para el monitoreo de la cubierta forestal [13].

Para clasificar la cobertura vegetal, el compuesto de color natural (NCC) se generó utilizando combinaciones adecuadas de bandas a partir de las imágenes satelitales Landsat adquiridas [14].

Teniendo en cuenta el "Sistema de Clasificación de tierras de Perú" y el objetivo de este estudio.

Dichas imágenes se catalogaron por el Método de Clasificación Supervisada en el entorno de IDRISI selva a través del algoritmo máxima probabilidad (Maxlike), y se emplearon para identificar las clases de cobertura forestal basadas en el algoritmo de Clasificación Supervisada de Máxima Verosimilitud (MLSC) [15], [16], [17].

El mapa clasificado de la cubierta forestal del área de estudio fue sometido a precisión y validación, adaptando el documento redactado por [18]. El coeficiente Kappa (K) [19], se emplea para la precisión de la clasificación de la cubierta forestal, el cual se muestra en Ec. (1):

$$K = \frac{\sum_{i=1}^r x_{ii}}{N} = \frac{\sum_{i=1}^r (x_{ii} \times x_{ii})}{\sum_{i=1}^r (x_{ii} \times x_{ii})} \quad (1)$$

El K es el coeficiente kappa, N es el número total de sitios de entrenamiento de las imágenes ráster, r es el número de filas en la matriz, x_{ii} es el número de las filas i y columna i.

Para simular el cambio de cobertura forestal del área de estudio, se utilizó el modelo de cadena de Markov para determinar el cambio de cobertura forestal para el año 2030. Los autómatas celulares se utilizaron para estimular el tiempo-espacio y subyacer a la dinámica de los cambios en el área de estudio [20]. La cadena de Markov y los autómatas celulares fueron apoyados con los mapas clasificados de cobertura forestal del año 2002 y 2021. Con base en la matriz de probabilidad de transición entre las imágenes clasificadas del año 2002 y 2021, se predijo la cubierta forestal para el año 2030. El modelo CA-Markov utilizado en este estudio fue descrito según [9] en Ecu. (2), (3).

$$S_{t+1} = f(S_t, N) \quad (2)$$

Aquí, S representa el conjunto de estados de las celdas finitas; t y t + 1 son los primeros años y el último año; N es la vecindad de las celdas, y f es la regla de conversión del espacio local.

$$[P_{11}P_{12} \dots P_{1n} \dots P_{n1}P_{n2} \dots P_{nn}] \quad (3)$$

Donde P representa la matriz de probabilidad en el modelo de Markov, y P_{ij} es la probabilidad de convertir del estado actual i al estado j en el siguiente período. S es el

estado de uso de la tierra, y t; t + 1 es el punto de tiempo y esto fue descrito de acuerdo con [9] usando la Ecuación (4). El flujo de trabajo del presente estudio se mostró en la Fig. 1.

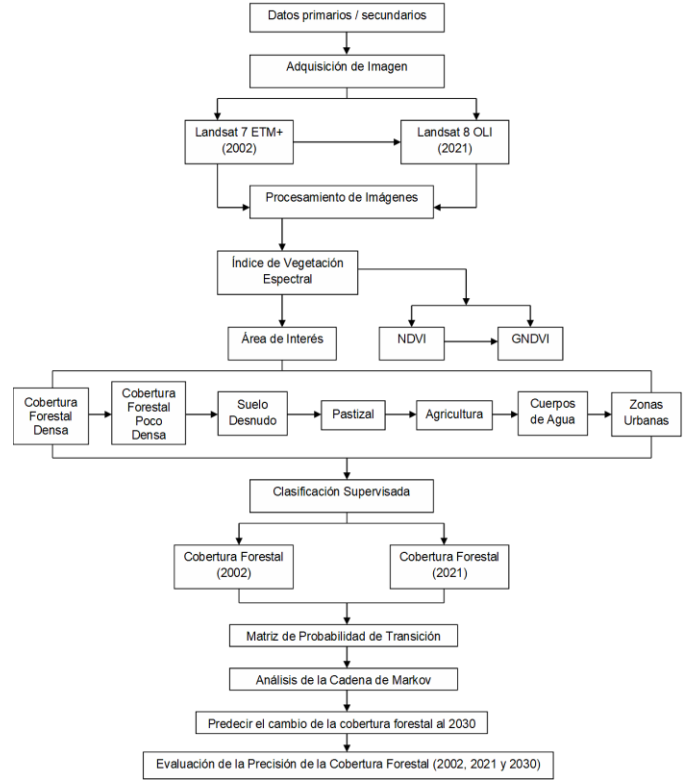
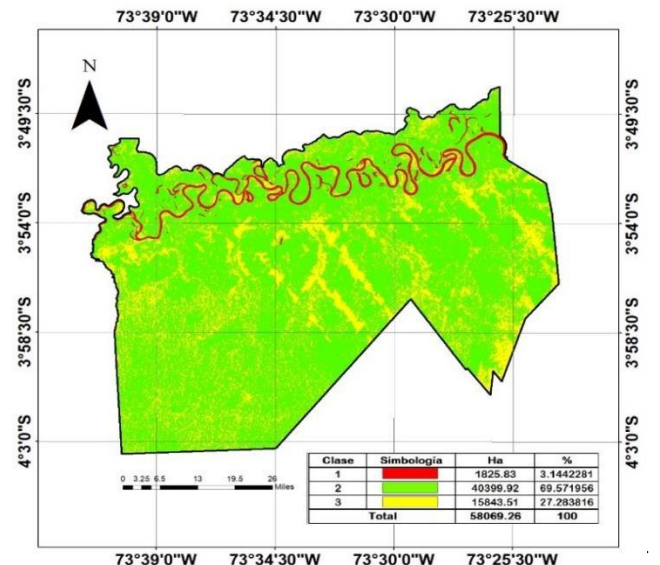


Fig 1. Flujo de trabajo

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

El presente estudio empleó los índices de vegetación espectral (NDVI y GNDVI) y el modelo de la cadena de Markov para evaluar la pérdida de cobertura forestal en la Reserva Nacional Alpahuayo Mishana, en el periodo 2002 – 2021.



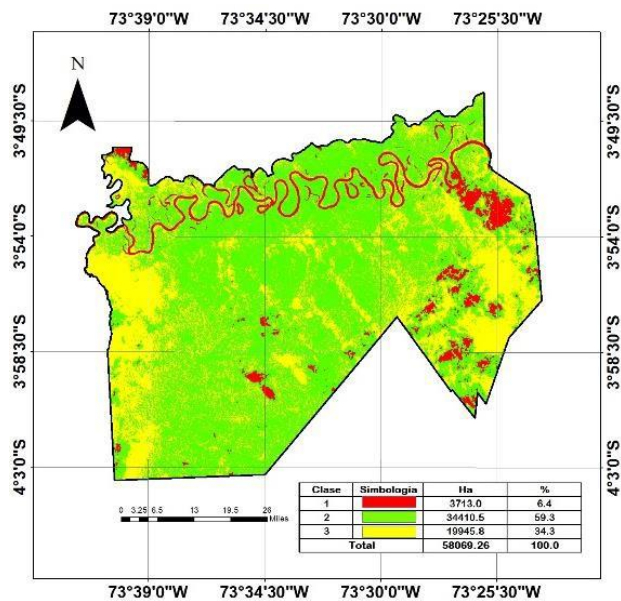


Fig 3. NDVI del año 2021 en la Reserva Nacional Allpahuayo Mishana.

En las Fig.2 y 3, se muestra el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en la Reserva Nacional Allpahuayo Mishana, se observó que la alta actividad fotosintética, asociada con la vegetación densa, tendrá menos reflectancia en la banda roja y mayor reflectancia en la del infrarrojo cercano. Obteniendo como resultado que el NDVI en el año 2002 presento densidad alta con 71% (41316.03 ha) y para el 2021 disminuyó a un 59% (34410.5 ha), en cuanto a la densidad media el año 2002 presento 26% (14932.89 ha) que a comparación del año 2021 aumentó en un 34% (19945.8 ha), con respecto a la densidad baja el año 2002 presento 3% (1820.34 ha) y en 2021 aumentó en 6% (3713.0 ha). Al respecto, [25], [26], [27] sostienen que el NDVI permite calcular la cantidad, calidad y el estado de desarrollo vegetativo y sus valores varían desde -1 (coberturas sin vegetación) a 1 (vegetación densa y sana).

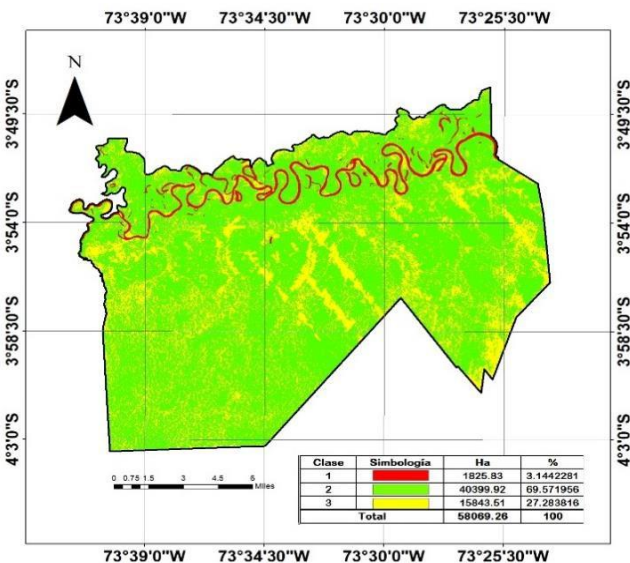


Fig 4. GNDVI del año 2002 en la Reserva Nacional Allpahuayo Mishana.

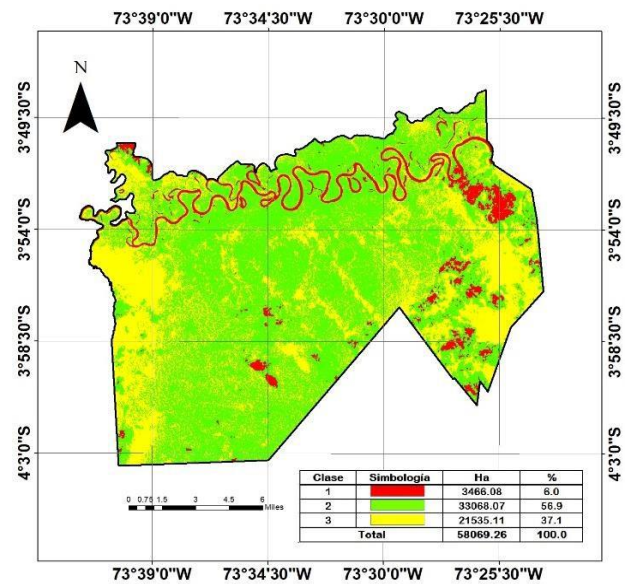


Fig 5. GNDVI del año 2021 en la Reserva Nacional Allpahuayo Mishana.

En las Fig. 4 y 5, se muestra el Índice de vegetación de diferencia normalizada verde (GNDVI), esta reemplaza la banda Roja por la Verde, permitiendo mostrar la clorofila en sus diversas concentraciones. Estos índices han proporcionado evidencia y una fácil evaluación de la cobertura forestal pasada y presente de la investigación. Obteniendo como resultado que el GNDVI en el año 2002 presento densidad alta con 69% (1825.83 ha) y para el 2021 disminuyó a un 57% (33068.07 ha), en cuanto a la densidad media el año 2002 presento 27% (15843.51 ha) que a comparación del año 2021 aumentó en un 37% (21535.11 ha), respecto a la densidad baja se obtuvo 3% (1825.83 ha) y para el año 2021 aumentó en 6% (3466.08 ha). En tal sentido, [28], [29] sustentan que el GNDVI permite demostrar la clorofila en sus diversas concentraciones y sus valores varían entre 0,6 a 1, suelos de áreas cubiertas con vegetación saludable, sus valores negativos pertenecen a superficies cubiertas de agua y/o a suelo desnudo de vegetación.

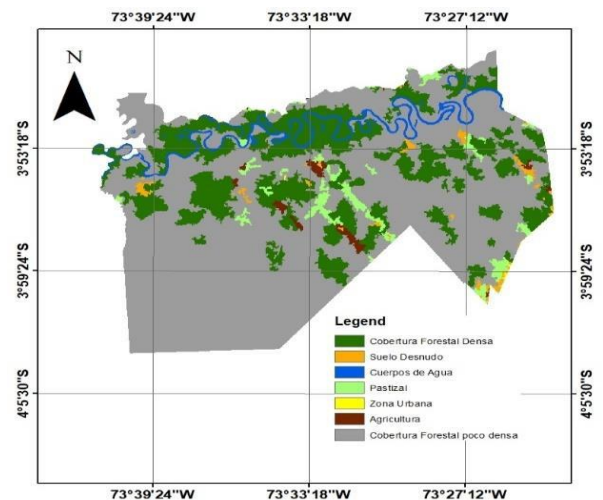


Fig 6. Clasificación Supervisada del año 2002 en la Reserva Nacional Allpahuayo Mishana.

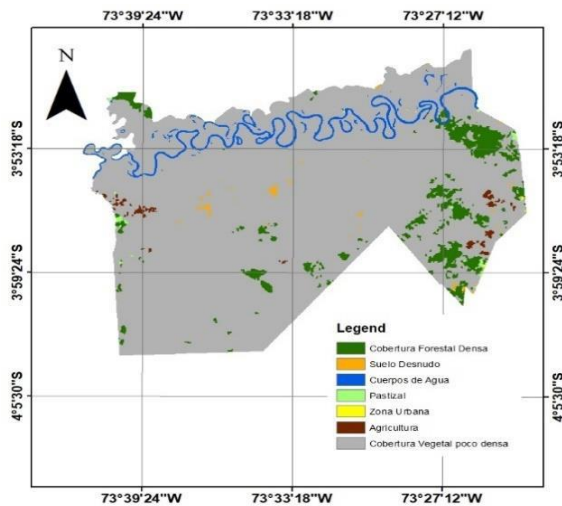


Fig 7. Clasificación Supervisada del año 2021 en la Reserva Nacional Allpahuayo Mishana.

En las Fig. 6 y 7, se realizó la clasificación supervisada de los años 2002 y 2021 respectivamente utilizando las características de evaluación periódica y el compuesto de color natural analizado (NCC) se utilizaron para realizar la clasificación, centrándose en la cobertura forestal densa, suelo desnudo, cuerpos de agua, pastizal, zonas urbanas, agricultura y cobertura forestal poco densa empleando el software Idrisi Selva. Los autores [15], [17], [30] consideran que el algoritmo de Clasificación Supervisada de Máxima Verosimilitud (MLSC) se aplica debido a su eficiencia de detalle y a que facilita la clasificación.

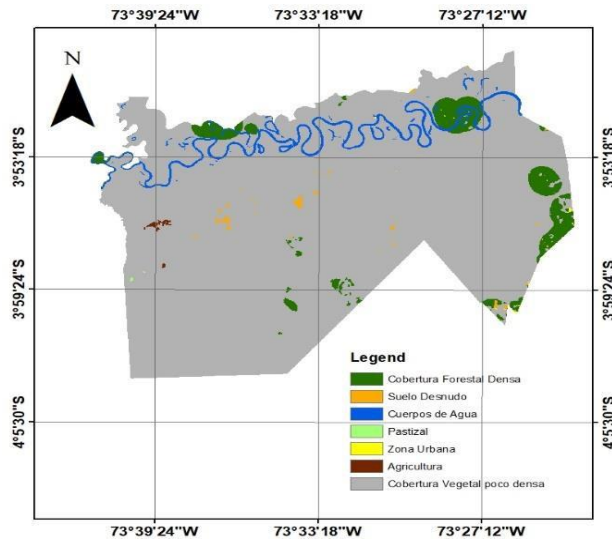


Fig 8. Predicción al año 2030 en la Reserva Nacional Allpahuayo Mishana.

En la Fig. 8 se realizó la predicción del cambio de uso de suelo en la Reserva Nacional Allpahuayo Mishana para el año 2030 utilizando el modelo CA-Markov y se sometió a interpretación visual de imágenes, cognición de patrones y colores que muestra una gran eficiencia aislando la cobertura forestal del año 2030 del área de estudio. Por consiguiente, [31], [32] postulan que una de las formas fáciles y precisas de extraer información de datos de teledetección es mediante la cognición de patrones y colores.

TABLA I
CLASIFICACIÓN DEL USO DE SUELO Y COBERTURA FORESTAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

Uso de Suelo / Cobertura Forestal	2002		2021	
	ha	%	ha	%
Cobertura Forestal Densa	13578.93	23.39	3232.97	5.57
Suelo desnudo	591.18	1.02	185.38	0.32
Cuerpos de agua	1696.24	2.92	1648.53	2.84
Pastizal	1627.80	2.80	122.36	0.21
Zonas urbanas	27.85	0.05	29.15	0.05
Agricultura	535.66	0.92	340.12	0.59
Cobertura Forestal Poco densa	40005.64	68.90	52505.82	90.43
Total	58063.31	100.00	58064.33	100.00

En la Tabla I, utilizando la clasificación supervisada para el año 2002 y 2021, se observó que en el año 2002 están en el siguiente orden: 68.90% (cobertura forestal poco densa) con 40005.64 ha, 23.39% (Cobertura forestal densa) con 13578.93 ha, 2.80% (pastizal) con 1627.80 ha, 0.92% (agricultura) con 535.66 ha, 1.02% (suelo desnudo) con 591.18 ha, 2.92% (cuerpos de agua) con 1696.24 ha y 0.05% en zonas urbanas con 27.85 ha. Sin embargo, los cambios significativos observados en el mapa de clasificación de cobertura forestal del año 2021 revelaron que la cobertura forestal densa, suelo desnudo, pastizal y agricultura disminuyeron del 23.39% al 5.57%, del 1.02% al 0.32%, del 2.80% al 0.21% y agricultura del 0.92% al 0.59% respectivamente.

TABLA II
PREDICCIÓN DEL USO DE SUELO Y COBERTURA FORESTAL AL AÑO 2030 EN LA ZONA DE ESTUDIO

Uso de Suelo/ Cobertura Forestal	2030	
	ha	%
Cobertura Forestal Densa	2515.96	4.33
Suelo Desnudo	168.62	0.29
Cuerpos de Agua	1649.47	2.84
Pastizal	7.76	0.01
Zonas Urbanas	29.16	0.05
Agricultura	64.34	0.11
Cobertura Forestal poco Densa	53630.61	92.36
Total	58065.91	100.00

En la Tabla II, se puede observar los datos obtenidos según la predicción del cambio de uso de suelo al año 2030, lo cual muestra un incremento de cobertura forestal poco densa de 68.90% en el año 2002, a 92.36% para el año 2030. Debido a las malas prácticas de uso de suelo que generan deforestación en lugares específicos donde existía una cobertura forestal más densa.

El análisis estadístico de la cubierta forestal multitemporal revela que se han producido cambios en la Reserva Nacional Allpahuayo Mishana (Tabla I y II). Para el experto [33], el análisis de cobertura y uso de suelo implica la implementación de múltiples y diversos métodos

estadísticos orientados a describir, evaluar, analizar, explicar y predecir, en términos cuantitativos, la dinámica de las distintas coberturas terrestres. En esta investigación, las matrices de probabilidad de transición para el año 2030 del área de estudio representan la base cuantitativa de las estimaciones futuras de cambio de cobertura forestal. En base a ello, se considera que, en las zonas de cobertura forestal, pastizales y de agricultura va a aumentar la probabilidad de recuperación, en las zonas urbanas puede que construyan casas y en las zonas de amortiguamiento de la Reserva Nacional Allpahuayo Mishana se va a desarrollar actividades de reforestación, sin embargo, todo va depender de las medidas y políticas de manejo sobre la cobertura forestal que implementen las autoridades y entidades competentes.

IV. CONCLUSIONES

La presente investigación identificó el patrón de cambio de cobertura forestal en el periodo 2002 – 2021, utilizando índices de vegetación espectral y la cadena de Markov en la Reserva Nacional Allpahuayo Mishana. La predicción de cambio de cobertura forestal muestra que este tipo de predicción puede ayudar a gestionar el cambio gradual o repentino de la cobertura forestal causado por actividades humanas como la deforestación, tala ilegal y la expansión de las prácticas agrícolas inadecuadas.

El uso de los índices de vegetación espectral revela que el NDVI y GNDVI sirvió como técnicas indispensables utilizadas en la evaluación y monitoreo de la pérdida de cobertura forestal con mayor precisión y menor tiempo. La cadena de Markov fue una herramienta de vital importancia para el análisis de la cubierta forestal, donde se descubrió que el patrón de la cubierta forestal varió significativamente desde el año 2002 hasta 2030.

Los resultados del cambio de cobertura forestal revelan que el suelo desnudo, cuerpos de agua, cobertura forestal densa, y cobertura forestal poco densa aumentaran en un 1%, 2%, 8% y 89% respectivamente. Esto indica que la Reserva Nacional Allpahuayo Mishana experimentó deforestación y expansión de las actividades agrícolas, lo cual puede contribuir al cambio climático de dicha reserva. Por lo tanto, existe una necesidad urgente de integrar enfoques participativos, desarrollar actividades de protección y recuperación de los bosques de las reservas Naturales de la Amazonía Peruana en base a la legislación y política ambiental vigente.

AGRADECIMIENTOS

A nuestros padres, por los consejos, valores y principios que nos han inculcado.

A nuestros asesores Mg. Jessica Lujan Rojas y Mg. Grant Llaque Fernández quienes nos han guiado con su paciencia y su rectitud.

A los docentes de la Escuela de Ingeniería Ambiental de la Universidad Privada del Norte, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de nuestra preparación profesional.

REFERENCIAS

- [1] M. Dourojeanni, “Loreto sostenible al 2021”, 2013.
- [2] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, “El estado de los bosques del mundo”, 2020.
- [3] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, “Evaluación de los recursos forestales mundiales”, 2020.
- [4] World Resource Institute, “La pérdida de cobertura arbórea mundial ascendió al 51 por ciento en 2016”, 2017.
- [5] EFE News Services, “Amazonía perdió 2,3 millones de hectáreas en 2020, su tercer peor registro”, 2021.
- [6] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, “Bosques y Cambio Climático”, 2016.
- [7] Monitoring of the Andean Amazon Project, “Deforestación en la Amazonía 2020”, 2021.
- [8] J. Álvarez, J. Díaz y N. Shany, “Avispa de la Reserva Nacional Allpahuayo Mishana, Loreto, Perú”, Neotropical Bird Club, pp. 61-84, 2010.
- [9] P. Subedi y B. Thapa, “Aplicación de un autómata celular híbrido – Modelo de Markov (CA-Markov) en la predicción del cambio de uso de la tierra: un estudio de caso de la cuenca de drenaje de Saddle Creek, Florida”. *Ecología Aplicada y Ciencias Ambientales*, vol. 1, n° 6, pp. 126-132, 2013.
- [10] K. Loayza, “Análisis multitemporal de los cambios de la cobertura boscosa y su proyección para el 2025 en la Estación Biológica Villa Carmen, Cusco”, 2020.
- [11] G. Alarcón, J. Díaz, M. Vela, J. Quiñonez, P. Zevallos y J. Gutiérrez, “Valor de conservación en bosques de comunidades indígenas: Un estudio de caso en la Amazonia Peruana, San Jacinto y Puerto Arturo”, *Revista de Investigaciones Altoandinas*, vol. 20, n° 3, pp. 301-314, 2018.
- [12] M. Dourojeanni, “Ocupación humana y áreas protegidas de la Amazonia del Perú”, *Ecología Aplicada*, vol. 13, n° 2, pp. 225-232, 2014.
- [13] Z. Jiang, A. Huete, J. Chen, Y. Chen, J. Li, G. Yan y X. Zhang, “Análisis de NDVI y diferencia a escala del índice de vegetación recuperaciones de la fracción de vegetación”, *Teledetección del medio ambiente*, vol. 101, n° 3, pp. 366-378, 2006.
- [14] T. Good y P. Giordano, “Methods for Constructing a Color Composite Image: Google Patents”, 2019.
- [15] H. Liu y Q. Zhou, “Análisis de precisión de la detección de cambios de teledetección por regla-evaluación de la racionalidad basada en la comparación posterior a la clasificación”, *Revista Internacional de Teledetección*, vol. 25, n° 4, pp. 1037-1050, 2005.
- [16] Y. Sun, Q. Zhou, X. Xie y R. Liu, “Evaluación espacial, de fuentes y de riesgos de la contaminación por metales pesados de suelos urbanos en regiones típicas de Shenyang, China”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 174, n° 1-3, pp. 455-462, 2010.
- [17] K. Biro, B. Pradhan, M. Buchroithner y F. Makeschin, “Uso de la tierra/Cobertura del suelo análisis de cambios y su impacto en las propiedades del suelo en la parte norte de Gadarifregion, Sudán”, *Degradación de Tierras*, vol. 24, n° 1, pp. 90-102, 2013.
- [18] R. Pontius y M. Millones, “Muerte a Kappa: nacimiento del desacuerdo de cantidad y desacuerdo de asignación para la evaluación de la exactitud”, *Revista Internacional de Teledetección*, vol. 32, n° 15, pp. 4407-4429, 2011.
- [19] Cohen, “Ecuación Coeficiente Kappa”, 1960.
- [20] I. Balogun y K. Ishola, “Projection of future changes in landuse/landcover using cellular automata/markov model over Akure city, Nigeria”, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 5, n° 1, pp. 22-31, 2017.
- [21] E. Chuvieco, “Teledetección ambiental la observación de la Tierra desde el espacio”, 2007.
- [22] J. Jensen, “La Teledetección del medio Ambiente: Una Perspectiva de Recursos de la Tierra”, 2020.
- [23] E. Lambin, B. Turner, H. Geist, S. Agbola, A. Angelsen, J. Bruce, O. Coomes, R. Dirzo, G. Fisher, C. Folke, K. Homewood, J. Invernizzi, R. Leamas, X. Li, E. Morán, P. Ramakrishnan y J. Xu, “The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths”, *Global Environmental Change*, vol. 11, n° 4, pp. 261-269, 2021.
- [24] R. Camacho, J. Camacho, M. Balderas y M. Sanchez, “Cambios de cobertura y uso de suelo: estudio de caso en Progreso Hidalgo, Estado de México”, *Madera y Bosques*, vol. 23, n° 3, pp. 39-60, 2017.
- [25] E. Chuvieco, “Teledetección ambiental la observación de la Tierra desde el espacio”, 2007.

- [26] M. Perea, H. Andrade y M. Segura, "Estimación de Biomasa Aérea y Carbono con Teledetección en Bosques Alto-Andinos de Boyacá, Colombia. Estudio de caso: Santuario de Fauna y Flora Iguaque", *Revista Cartográfica*, vol. 102, pp. 91-123, 2021.
- [27] M. Mendoza, R. Salas y E. Barboza, "Análisis multitemporal de la deforestación usando la clasificación basada en objetos, distrito de Leymebamba (Perú)", *Revista INDES*, vol. 3, n° 2, 2015.
- [28] J. Jensen, "La Teledetección del medio Ambiente: Una Perspectiva de Recursos de la Tierra", 2020.
- [29] D. Revelo, J. Mejía, B. Montoya y J. Hoyos, "Análisis de los índices de vegetación NDVI, GNDVI y NDRE para la caracterización del cultivo de café (*Coffea arabica*)", *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, vol. 38, n° 2, pp. 2145-9371, 2020.
- [30] Y. Sun, Q. Zhou, X. Xie y R. Liu, "Evaluación espacial, de fuentes y de riesgos de la contaminación por metales pesados de suelos urbanos en regiones típicas de Shenyang, China", *J. Peligro. Mater.*, vol. 174, n° 1, pp. 455-462, 2013.
- [31] T. Bakx, Z. Koma, A. Seijmonsbergen y W. Kissling, "Uso y categorización de las métricas de vegetación LiDAR en la investigación de la diversidad aviar y la distribución de especies", *Repositorio digital Dryad*, 2019.
- [32] Banco Mundial, "Documento de política del sector forestal", Washington. DC, 1991.
- [33] R. Camacho, J. Camacho, M. Balderas y M. Sanchez, "Cambios de cobertura y uso de suelo: estudio de caso en Progreso Hidalgo, Estado de México", *Madera y Bosques*, vol. 23, n° 3, pp. 39-60, 2017.
- [34] G. Alarcon, R. Canahuire, F. Guevara, L. Rodríguez, L. Gallegos y J. Garate, "Dinámica de la pérdida de bosques en el sureste de la Amazonia peruana: un estudio de caso en Madre de Dios", *Ecosistemas*, vol. 30, n° 2, 2021.
- [35] R. Aragón, "Percepciones de Gestión del Turismo Sostenible: Estudio Comparativo en Dos Comunidades Aledañas a Reservas Nacionales (Tambopata y Titicaca), Perú", *Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Agraria La Molina*, 2018.
- [36] J. Arnau y R. Bono, "Estudios longitudinales de medidas repetidas. Modelos de diseño y análisis", *Escritos de Psicología (Internet)*, vol. 2, n° 1, pp. 32-41, 2008.
- [37] A. Campo, R. García, A. Marinas y M. Gartzia, "Relaciones entre el índice espectral de vegetación NDVI y la cobertura vegetal en pastos de puerto del Pirineo Occidental", 2005.
- [38] A. Cárcamo y J. Rejas, "Análisis multitemporal mediante teledetección espacial y SIG del cambio de cobertura del suelo en el municipio de Danlí, El Paraíso, en los años 1987 -2011", *Revista Ciencias Espaciales*, vol. 8, n° 2, pp. 259-271, 2015.
- [39] L. Caro, "7 técnicas e instrumentos para la recolección de datos", 2019.
- [40] Comisión Económica para América Latina y el Caribe, "Amazonia posible y sostenible", 2013.
- [41] G. Flores, A. Rincón, P. Cardona y A. Alzate, "Multitemporal analysis of the vegetation cover in the area of influence of the mines located in the high part of Maltería in Manizales, Colombia", *Dyna*, vol. 84, n° 201, pp. 95-101, 2017.
- [42] G. Foody, "Status of land cover classification accuracy assessment", *Remote Sensing of Environment*, vol. 80, n° 1, pp. 185-201, 2002.
- [43] Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, "Climate Change 2013: The Physical Science Basis", 2013.
- [44] R. Hernandez, C. Fernández y P. Baptista, "Metodología de la Investigación", *Mc Graw Hill*, 2014.
- [45] N. Hosonuma, M. Herold, V. De Sy, R. De Frie, M. Brockhaus, L. Verchot, A. Angelsen y E. Romijn, "An assessment of deforestation and forest degradation drivers in developing countries", *Environmental Research Letters*, vol. 7, n° 4, 2012.
- [46] Interfaith Rainforest Initiative, "Bosques tropicales: Un recurso bajo amenaza", 2019.
- [47] C. Manterola y T. Otzen, "Estudios Observacionales. Los Diseños Utilizados con Mayor Frecuencia en Investigación Clínica", *International Journal of Morphology*, vol. 32, n° 2, pp. 634-645, 2014.
- [48] R. Martínez, A. Montoya y N. Camacho, "La cobertura vegetal en la cuenca del Canal de Panamá", 2018.
- [49] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, "Estudio de las Causas de la Deforestación y Degradación Forestal en Guinea Ecuatorial", 2014.
- [50] Organismo de Supervisión de los Recursos Forestales y de Fauna Silvestre, "Análisis de pérdida de cobertura forestal en la zona geográfica de integración fronteriza con los países de Colombia, Brasil y Bolivia", 2014.
- [51] J. Ramírez y A. Galán, "Amazonía: Posible y Sostenible", 2013.
- [52] Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado, "Áreas Naturales Protegidas del Perú", 2015.
- [53] Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado, "Allpahuayo Mishana", 2019.
- [54] H. Soria y B. Soria, "Determinación de la capacidad de carga turística en los sitios de visita de la Reserva Nacional Allpahuayo-Mishana, Loreto, Perú", *Ciencia amazónica (Iquitos)*, vol. 5, n° 1, pp. 25-34, 2015.
- [55] F. Speranza y H. Zerda, "Potencialidad de los índices de vegetación para la discriminación de coberturas forestales", 2005.
- [56] P. Towers, "Conceptos Iniciales sobre Teledetección y su Aplicación al Agro", 2002.
- [57] N. Ugalde y F. Balbastre, "Investigación cuantitativa e Investigación cualitativa: buscando las ventajas de las diferentes metodologías de Investigación", *Ciencias Económicas*, vol. 31, n° 2, pp. 179-187, 2013.
- [58] J. Ventura, "¿Población o muestra?: Una diferencia necesaria", *Revista Cubana de Salud Pública*, vol. 43, n° 4, 2017.