



Evaluación del bosque húmedo tropical mediante el análisis de la cobertura fraccional y técnicas SIG en la subcuenca del río Yuracyacu, Amazonía peruana

Evaluation of the tropical humid forest through fractional cover analysis and GIS techniques at Yuracyacu river watershed, peruvian's Amazon

Jhon Walter Gómez-Lora^{1,2,3*}, Víctor Hugo Gallo-Ramos^{1,2,3} y Katherine del Carmen Camacho-Zorogastúa^{1,2,3}

1 Instituto Especializado de Investigación y Gestión del Agua. Lima, Perú.

3 Environmental and Hydrologic Engineering. Lima, Perú.

* Autor de correspondencia. jgomez@unfv.edu.pe

2 Universidad Nacional Federico Villarreal. Lima, Perú.

RESUMEN

En este estudio se evaluó la cobertura boscosa en la subcuenca del río Yuracyacu durante el periodo 1989-2010. Para esto se utilizaron 6 imágenes satelitales Landsat del sensor Thematic Mapper de los años 1989, 1995, 2001, 2006, 2008, 2010, sobre las cuales se realizaron los respectivos procesamiento utilizando CLASlite mediante el análisis de la cobertura fraccional. Durante el periodo 1989-1995 se obtuvo una pérdida de 18.2 km² de la cobertura boscosa, para el periodo 1995-2001 la cobertura boscosa fue recuperada con una tasa de 1.2 km²/año; para los periodos 2001-2006, 2006-2008 y 2008-2010 se evidenciaron los progresivos retrocesos del bosque húmedo tropical, siendo estos 8.9 km², 3.4 km² y 7.5 km², respectivamente. En los 21 años se han perdido 32 km² de bosque tropical amazónico de la subcuenca con una tasa de deforestación -1.2% anual; la tasa de deforestación más alta se encontró en el periodo 1989-1995 y fue -2.27%. El modelo para determinar escenarios futuros de bosque tropical en la subcuenca estimó un área resultante de 89.1 km² para el año 2030, demostrando la progresiva disminución de bosque húmedo tropical. Finalmente, en la validación de los resultados se obtuvo una fiabilidad global igual a 85% y un índice de Kappa de 0.65 indicando la bondad y precisión de la clasificación. Los resultados de este estudio permitirán orientar acciones para la conservación y manejo del bosque húmedo tropical de la subcuenca.

PALABRAS CLAVE: CLASlite, cobertura boscosa, deforestación, índice de Kappa, Landsat, teledetección.

ABSTRACT

This paper evaluated the tropical humid forest at Yuracyacu watershed during the period 1989-2010. For this, 6 Landsat satellite images were used from the Thematic Mapper sensor for the years 1989, 1995, 2001, 2006, 2008, 2010, which the respective processing was carried out using CLASlite by analyzing the fractional cover. During the period 1989-1995 a loss of 18.2 km² of the forest cover was obtained, for the period 1995-2001 the forest cover was recovered in a ratio of 1.2 km²/year; for the periods 2001-2006, 2006-2008, and 2008-2010 it was observed the progressive decline of the tropical rain forest, these losses being 8.9 km², 3.4 km² and 7.5 km² respectively. In the 21 years, 32 km² of Amazon rainforest have been lost from the sub-basin with a deforestation rate -1.2% per year, the highest rate of deforestation was found in the period 1989-1995, which is -2.27%. The model for determining future tropical forest scenarios in the watershed estimated a resulting area of 89.1 km² by 2030, demonstrating the progressive decrease of tropical humid forest. Finally, in the validation of the results, a global reliability of 85% and a Kappa index of 0.65 were obtained indicating the goodness and precision of the classification. The results of this study will guide actions for the conservation and management of the tropical rainforest of the watershed.

KEYWORDS: CLASlite, forest cover, deforestation, Kappa index, Landsat, remote sensing.

INTRODUCCIÓN

Los bosques son recursos importantes que proporcionan diversos beneficios ambientales, económicos y sociales, debido a que suministran bienes como madera, fibras y otros productos forestales madereros y no madereros y desempeñan una función importante en el mantenimiento de los valores sociales y culturales; asimismo, protegen las cuencas hidrográficas, regulan el clima y conservan la diversidad biológica (Food and Agriculture Organization [FAO], 2012).

Según la Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales, en 1990, el mundo tenía 4128 millones de hectáreas de bosque; en el 2015 esa área había disminuido a 3999 millones de hectáreas. Esto representa un cambio de 31.6% a 30.6% de la superficie mundial de suelos durante 1990-2015. Esto demuestra que en este periodo se registró una pérdida neta de unos 129 millones de hectáreas de bosque, que representa una tasa anual de pérdida de 0.13%, una superficie total del tamaño aproximado de Sudáfrica (FAO, 2016).

La pérdida de bosques conlleva a una reducción de bienes y servicios ambientales que prestan, tales como regulación de temperatura, producción de alimentos y materias primas, captura de dióxido de carbono (CO₂), conservación de biodiversidad, uso como hábitat, producción y regulación del agua en las cabeceras de cuenca y la relación cultural que muchas sociedades han establecido con los bosques alrededor del mundo (Hassan, Scholes y Ash, 2005).

Además, en las últimas décadas, la deforestación de estos ecosistemas ha contribuido significativamente al aumento de emisiones de carbono y otros gases de efecto invernadero (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2007). Houghton (2012) indica que, en el año 2000, entre 10% y 20% de las emisiones anuales mundiales de gases de efecto invernadero de origen antropogénico pueden ser atribuibles a la deforestación y degradación de bosques tropicales.

Por otro lado, Autoridad Nacional del Agua [ANA] (2018) menciona que los bosques influyen de forma directa

en la cantidad de agua disponible, ralentizando el flujo de agua, que se infiltra gradualmente a través del suelo, garantizando un suministro estable todo el año, contribuyendo con la recarga de las aguas subterráneas y, a la vez, mejora la calidad y cantidad de este recurso vital. Por tal razón, las cuencas boscosas suministran una gran parte del agua que se destina a satisfacer las necesidades domésticas, agrícolas, industriales y ecológicas de las zonas que se encuentran aguas arriba y aguas abajo de los ríos (FAO, 2009).

De acuerdo con la FAO (2020), del área total de bosques en el mundo 45% corresponde a los bosques tropicales y aproximadamente la mitad de ellos se encuentran en América Latina, principalmente en América del Sur. Los bosques de la cuenca amazónica están siendo amenazados por las tendencias sinérgicas en las economías, que pueden llevarlos a la degradación severa de más de la mitad de este ecosistema en el año 2030 (Nepsatd, Stickler, Soares-Filho y Merry, 2008). Según Soares-Filho *et al.* (2006) la cuenca amazónica registra altas tasas de deforestación, perdiéndose 15% en promedio de sus bosques desde el año 1970.

El Perú es parte de la cuenca amazónica, donde la totalidad de sus bosques son tropicales debido a su ubicación geográfica y cercanía con la línea ecuatorial, es el segundo país con extensión forestal en América Latina y es considerado entre los 10 países con mayor superficie boscosa a escala mundial (Cordero, 2011) y (FAO, 2020). Estos bosques amazónicos que se desarrollan alrededor del río Amazonas en Perú son los ecosistemas más extensos del planeta (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2017). Sin embargo, anualmente se pierde, 120 782 ha de bosques a causa de la deforestación (Minam, 2016a). En el 2001 la deforestación fue 830 km², mientras que en el 2014 superó los 1770 km² y se estima que al año 2030 exceda los 3500 km² (Minam, 2016b). Entre el 2001 y 2014 el departamento que acumuló más pérdidas de bosques fue San Martín con 359 945 ha (Minam, 2016a). Además, solo en el primer semestre del 2018 la Amazonía peruana ha perdido 23 000 ha de bosque (Diario Gestión, 2018), cuyas causas derivan



principalmente de factores directos e indirectos generados por el hombre (Geist y Lambin, 2002).

Las cuencas amazónicas que poseen bosques tropicales son sistemas que representan estructuras geológicas complejas, áreas de topografía variada, alta intemperización de suelos que los convierten en susceptibles a erosión hídrica, poseen cobertura vegetal y climatología variada en la que la deforestación afecta severamente los procesos hidrológicos locales y regionales en su calidad y cantidad (Neary, Ice y Jackson, 2009).

A pesar de su importancia hidrológica y alta biodiversidad, en el Perú existen esfuerzos reducidos para conservar este ecosistema, por ejemplo, existen áreas naturales protegidas (ANP) como el Bosque de Protección del Altomayo (BPAM), en la región San Martín; sin embargo, la deforestación continúa dentro y fuera de las ANP, por ejemplo, en la cuenca del Alto Mayo, se ha perdido aproximadamente 10% de bosque durante el periodo 2000-2012 (Hansen *et al.*, 2013).

Las cuencas del BPAM brindan importantes servicios ecosistémicos para las poblaciones locales tales como regulación del clima, producción de agua de buena calidad y abundante para el desarrollo de las actividades económicas. Por ejemplo, la subcuenca Yuracyacu provee agua limpia para la ciudad de Nueva Cajamarca (Iniciativa de Conservación del Alto Mayo [ICAM], 2011).

Pese a lo mencionado, no se han caracterizado los cambios que ha sufrido la cobertura boscosa a escala de cuencas, subcuencas o cabeceras de cuenca, que permitan identificar los factores e implicaciones ambientales y antrópicos que propicien la pérdida de bosques tropicales, lo cual trae como consecuencia cambios de cobertura y uso de suelo en la Amazonía peruana.

Por lo que las investigaciones se han enfocado en mejorar los sistemas de monitoreo de estos cambios, estudiar los procesos de modificación que sufre el bosque y desarrollar modelos para explorar escenarios futuros (Turner, Meyer y Skole, 1994; Geist y Lambin, 2001 y National Research Council [NRC], 2014). En ese sentido,

es de vital importancia generar información cuantitativa del *bosque húmedo tropical* a escala de cuencas a fin de obtener información a un mismo nivel que pueda ser comparable con otras regiones y estudiar las implicaciones ambientales ocasionadas por su degradación.

En el presente trabajo se evaluó la cobertura boscosa en la subcuenca del río Yuracyacu, afluente de la cuenca del río Mayo a partir de imágenes Landsat a fin de conocer sus cambios a través del tiempo. Este tipo de estudio es útil para generar conocimientos sobre la variación de la cobertura de bosque tropical y detectar tendencias que indiquen la necesidad de tomar acción sobre el adecuado manejo de la cobertura boscosa en la subcuenca.

OBJETIVOS

Evaluar la cobertura boscosa en la subcuenca del río Yuracyacu para el periodo 1989-2010, utilizando imágenes satelitales ópticas, a través del análisis de la cobertura fraccional mediante *Carnegie Landsat System Analysis – Lite* (CLASlite) y técnicas de sistemas de información geográfica (SIG). Para ello, fue necesario (i) delimitar la subcuenca del río Yuracyacu a fin de determinar su morfometría; luego, (ii) calcular las áreas boscosas para los años 1989, 1995, 2001, 2006, 2008 y 2010, (iii) estimar la tasa de deforestación con la ecuación propuesta por FAO y (iv) proponer un modelo que permitió conocer los cambios de la cobertura boscosa en diferentes periodos de tiempo a fin de realizar estimaciones en el área de estudio utilizando datos derivados de imágenes satelitales ópticas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El río Yuracyacu es afluente de la cuenca del río Mayo por la margen derecha y posee en su recorrido una longitud aproximada de 35 km. De la superficie total de la subcuenca del río Yuracyacu, 57% pertenece al Bosque de Protección del Altomayo y 23% a su área de amortiguamiento (Fig. 1).

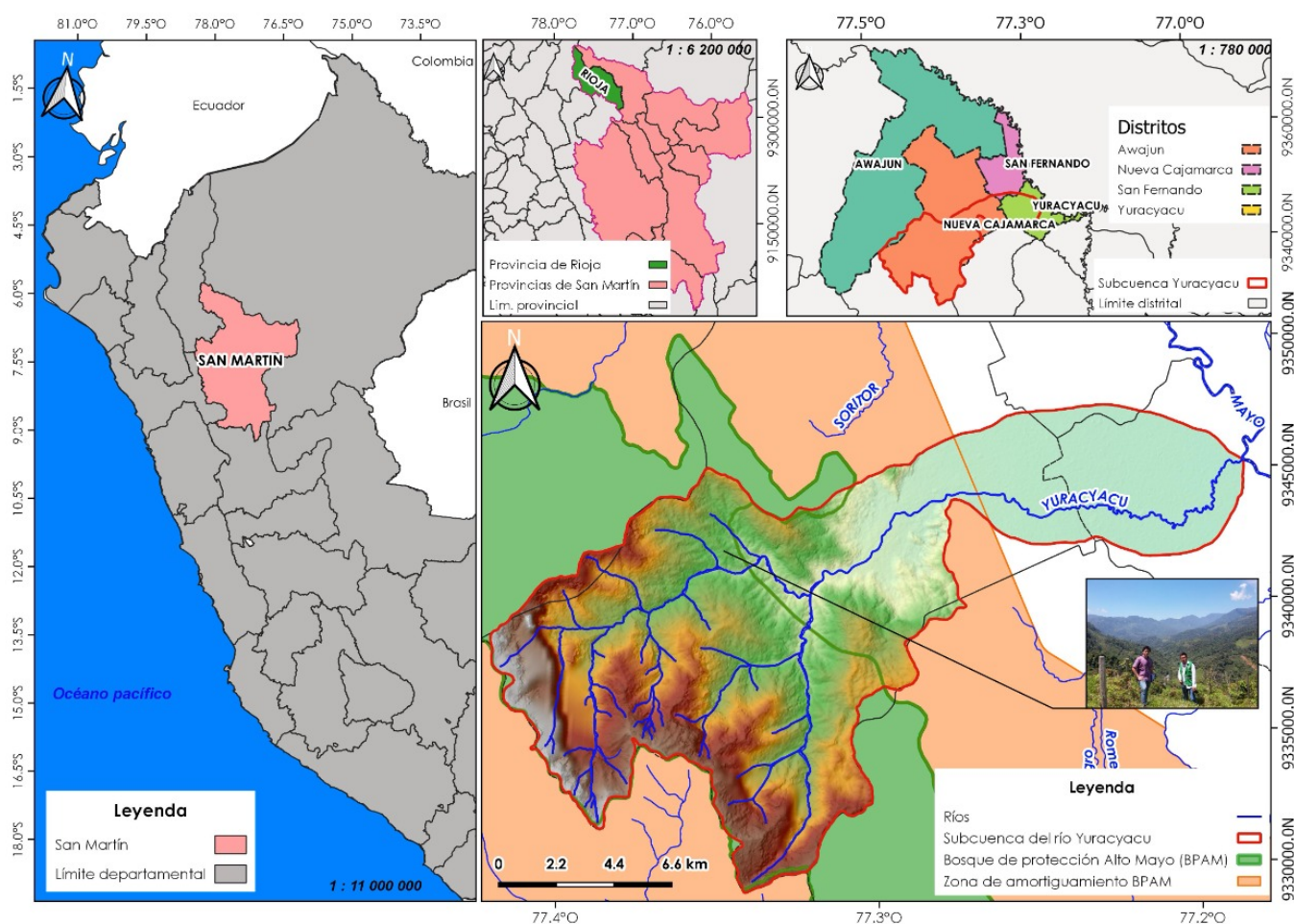


FIGURA 1. Localización de la subcuenca del río Yuracyacu.

Información utilizada

Se utilizaron las cartas nacionales con código 12-i (Nueva Cajamarca) y 13-j (Rioja), elaboradas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) a escala 1:100 000 (Ministerio de Educación [Minedu], 2018) y una imagen del satélite *Advanced Land Observation Satellite* (ALOS) de resolución 12.5 m para obtener información de relieve, ya que el área de estudio no contaba con información cartográfica (curvas de nivel y red hídrica). Además, se usó una imagen Landsat 5 del año 2010 para completar la red de drenaje, todo ello a fin de determinar las características físicas de la subcuenca mediante su morfometría.

Se usaron 6 imágenes del satélite Landsat con Path/Row 008/064, resolución espacial 30 metros, de fechas 23/07/1989, 09/08/1995, 25/08/2001,

08/09/2006, 12/08/2008 y 18/08/2010, correspondientes al sensor *Thematic Mapper* (TM) adquiridas por *United States Geological Survey* (USGS), las que pertenecen a la colección L1TP, es decir, se encuentran calibradas radiométricamente y ortorectificadas, utilizando un grupo de puntos de control y un modelo digital de elevación.

Los softwares utilizados fueron: (i) CLASlite 3.3, para el análisis de cobertura boscosa; (ii) QGIS 3.3, para la generación e integración de las bases de datos, junto al diseño de la subcuenca del río Yuracyacu; y (iii) ENVI 5.0, para la visualización de imágenes de reflectancia y cobertura fraccional de bosque. Finalmente, se usó un GPS MAP64S Garmin, para la toma de puntos en campo del bosque tropical de la subcuenca.



Morfometría de la subcuenca

Con la imagen satelital ALOS, la cartografía proporcionada por el IGN y la imagen Landsat se generó y corrigió la información cartográfica a fin de realizar el diseño de la subcuenca mediante su delimitación bajo el criterio de la divisoria topográfica, siguiendo la forma cóncava de las curvas de nivel a medida que la altitud aumenta (a) y cuando la altitud va disminuyendo toma la forma convexa de las curvas de nivel (b) (Fig. 2).

Luego, mediante la técnica SIG, usando el software QGIS 3.3, se diseñó la subcuenca a fin de determinar su morfometría analizando los parámetros fisiográficos de superficie, forma, relieve y red hídrica utilizando ecuaciones matemáticas que permitan su cuantificación e interpretación de acuerdo con Heras (1976), Gómez (1987) y Campos (1998).

Cobertura boscosa en la subcuenca

El análisis multitemporal de la cobertura boscosa se realizó mediante la cobertura fraccional usando el software

CLASlite versión 3.3, diseñado exclusivamente para la cuantificación de superficie boscosa, deforestación y perturbación a nivel de subpixel con base en imágenes de satélite.

Como paso inicial, se realizó la preparación de imágenes utilizando la herramienta *Prepare Landsat*, que tiene como función apilar las imágenes satelitales (Fig. 3). Luego, se realizó la calibración radiométrica para convertir la data de nivel digital (ND) en unidades que se puedan usar cuantitativamente (unidades de radiancia), para lo cual CLASlite utiliza factores de conversión proporcionados por los proveedores de los sensores satelitales. Para la corrección atmosférica, se utilizó el modelo de transferencia radiactiva 6S (Vermote, Tange, Deuze, Herman y Morcette, 1997) para simular el efecto de la atmósfera sobre la luz solar a medida que pasa a través de ella, la que interactúa con la superficie terrestre y regresa mediante la atmósfera al sensor satelital. La imagen cruda se corrige eliminando el modelo estimado de la atmósfera (Déborah, 2014) (Fig. 4).

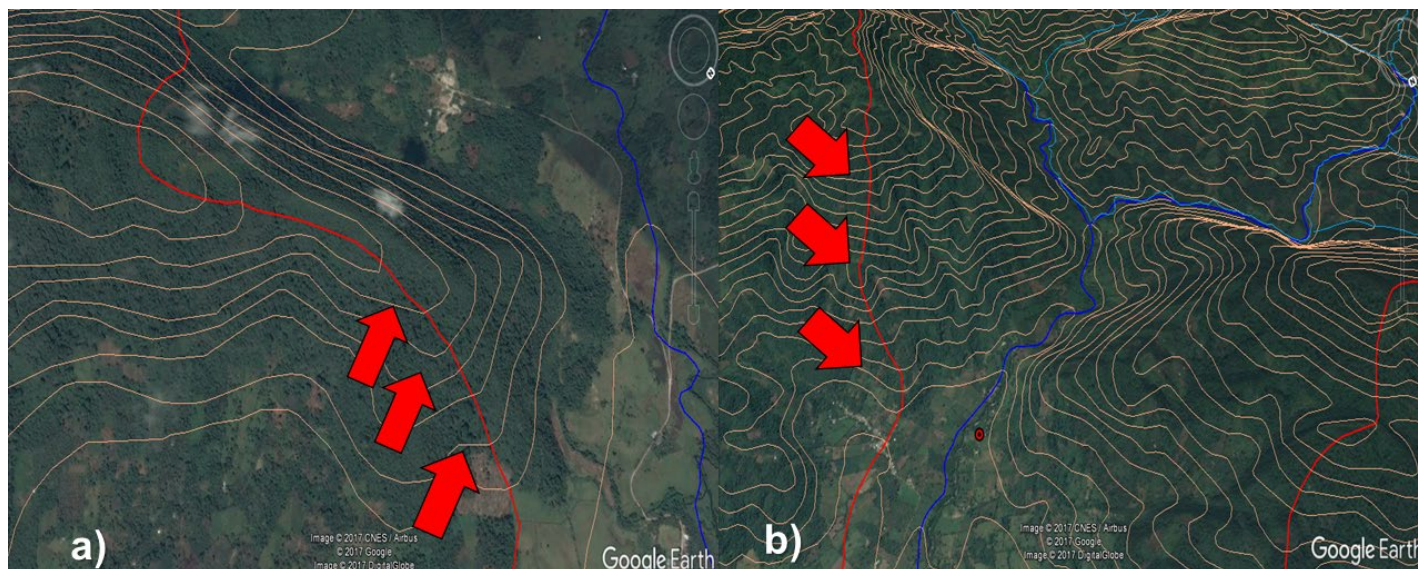


FIGURA 2. Delimitación según la divisoria topográfica.

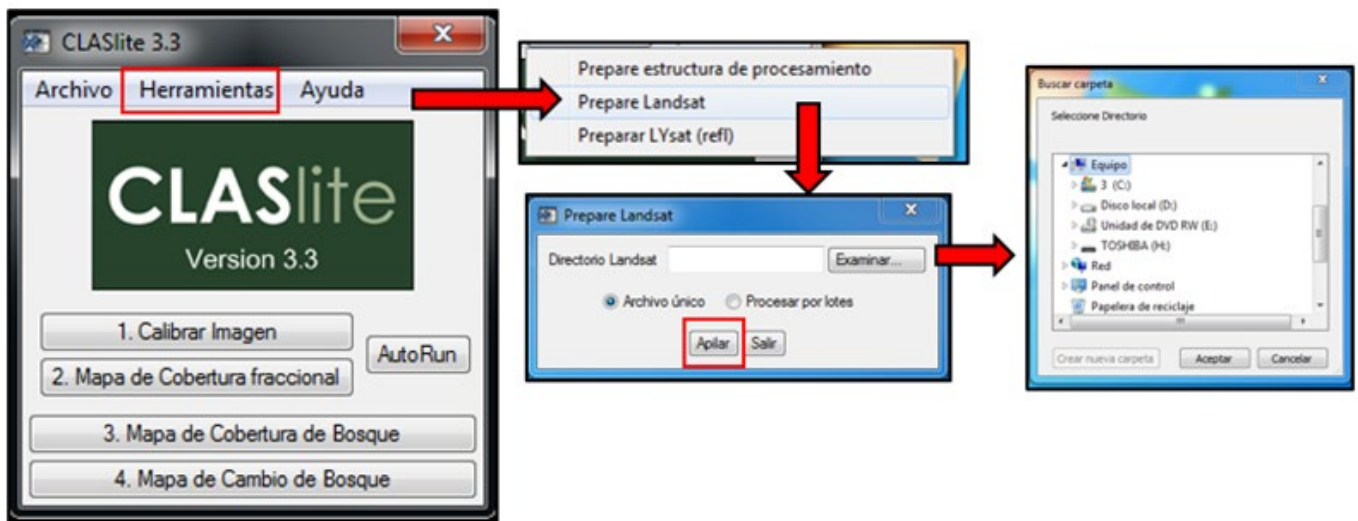


FIGURA 3. Preparación de imágenes Landsat.

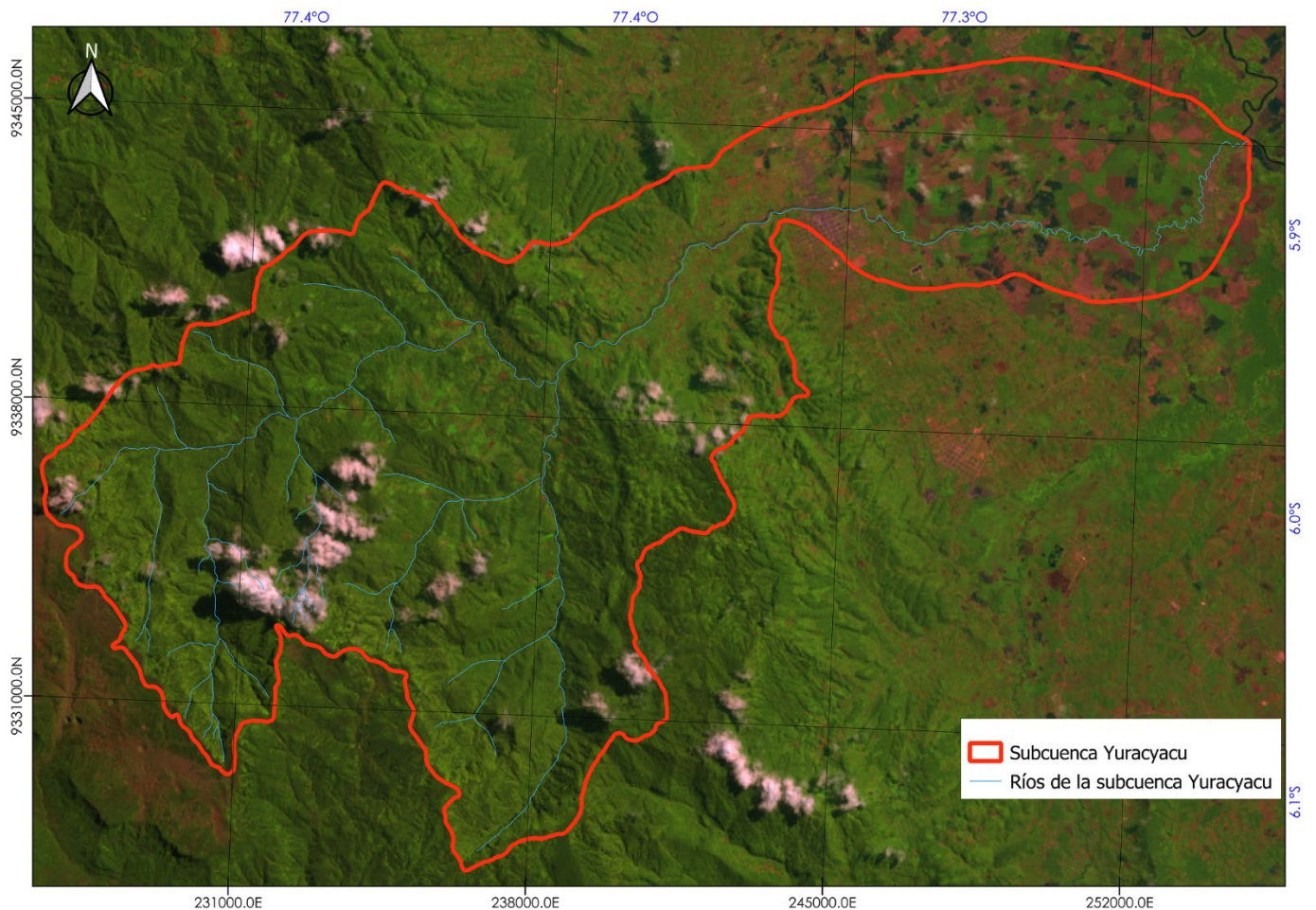


FIGURA 4. Imagen Landsat de reflectancia del año 2001.



El producto de reflectancia se convirtió en un mapa de cobertura de vegetación a nivel de subpixel o cobertura fraccional de las imágenes Landsat mediante la función de Segregación Espectral Automatizada Monte Carlo (AutoMCU) de CLASlite.

Esto es posible debido al análisis de mezcla espectral que realiza CLASlite, descomponiendo cada pixel en los tipos de cobertura que lo integran. Como la finalidad es mapear bosque, cada pixel debe descomponerse en clases que ayuden a entender lo que sucede con la vegetación en las imágenes, para esto CLASlite utiliza 3 clases: vegetación fotosintética (PV) $\rho_{pv}(\lambda)$, vegetación no fotosintética (NPV) $\rho_{npv}(\lambda)$ y sustrato expuesto (S) $\rho_{substrate}(\lambda)$ con valores de 0% a 100% (Tabla 1).

La PV representa la vegetación viva, la cual tiene propiedades espectrales únicas que están asociadas a los pigmentos fotosintéticos de las hojas, el contenido de agua y la cantidad de follaje en el dosel; y la NPV representa la vegetación muerta o senescente; incluye la hojarasca superficial, residuos de deforestación por tala y los pastos senescentes. Por último, S generalmente representa el suelo mineral expuesto y materia orgánica, también puede incluir rocas o infraestructura humana.

CLASlite incluye colecciones de espectros de caracteres puros para cada uno de los 3 tipos de clases que

se utilizaron para poder desagregar los pixeles en las 3 clases anteriormente explicadas, mediante la siguiente ecuación:

$$\rho(\lambda)\text{pixel} = \left[\left(C_{pv} \times \rho_{pv}(\lambda) \right) + \left(C_{npv} \times \rho_{npv}(\lambda) \right) + \left(C_{substrate} \times \rho_{substrate}(\lambda) \right) \right] + \varepsilon$$

Donde:

$\rho(\lambda)\text{pixel}$ = biblioteca de firmas de reflectancia

C_{pv} = subpixel de cobertura fotosintética

C_{npv} = subpixel de cobertura no fotosintética

$C_{substrate}$ = subpixel del sustrato o suelo

La ecuación tiene un valor diferente de longitud de onda y utiliza la reflectancia de un carácter espectral puro aleatorio de esa longitud de onda, entonces aquí el enfoque Monte Carlo de CLASlite repite el proceso de selección (con 50 iteraciones se logra converger en una solución estable) de forma aleatoria hasta que la solución converge en un valor promedio. El resultado es una imagen clasificada en estas coberturas a nivel de subpixel con la finalidad de establecer la superficie de cobertura boscosa y sus cambios, cuyos procesos se observan mejor a nivel subpixel (Fig. 5).

Las nubes también se enmascaran; sin embargo, en algunas imágenes se debieron ajustar los umbrales para que el proceso fuera más robusto (Fig. 6).

TABLA 1. Tipos de cobertura fraccional.

Tipo	Símbolo	Clase espectral	Descripción
Vegetación fotosintética	PV	$\rho_{pv}(\lambda)$	Vegetación viva.
Vegetación no fotosintética	NPV	$\rho_{npv}(\lambda)$	Vegetación muerta o senescente.
Sustrato expuesto	S	$\rho_{substrate}(\lambda)$	Suelo mineral expuesto y materia orgánica.

Fuente: Adaptado de (Asner, Knaap, Balaji y Perez-Acosta, 2009).

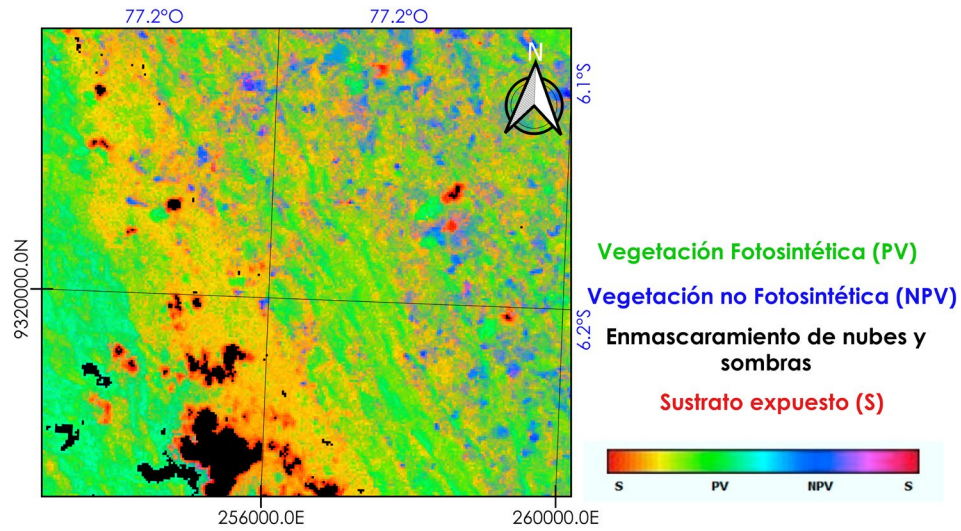


FIGURA 5. Cobertura fraccional.

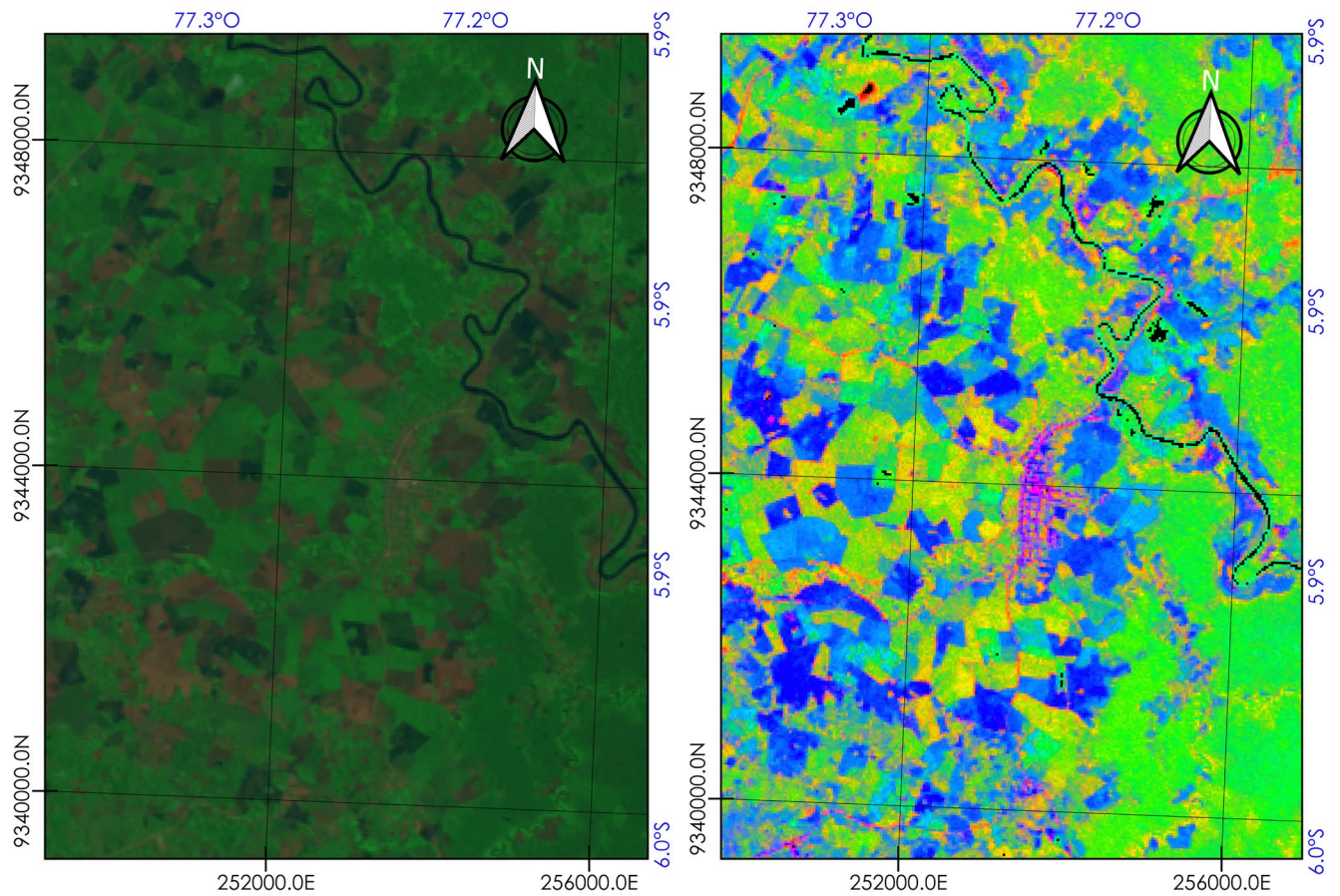


FIGURA 6. Imagen cruda y de cobertura fraccional.

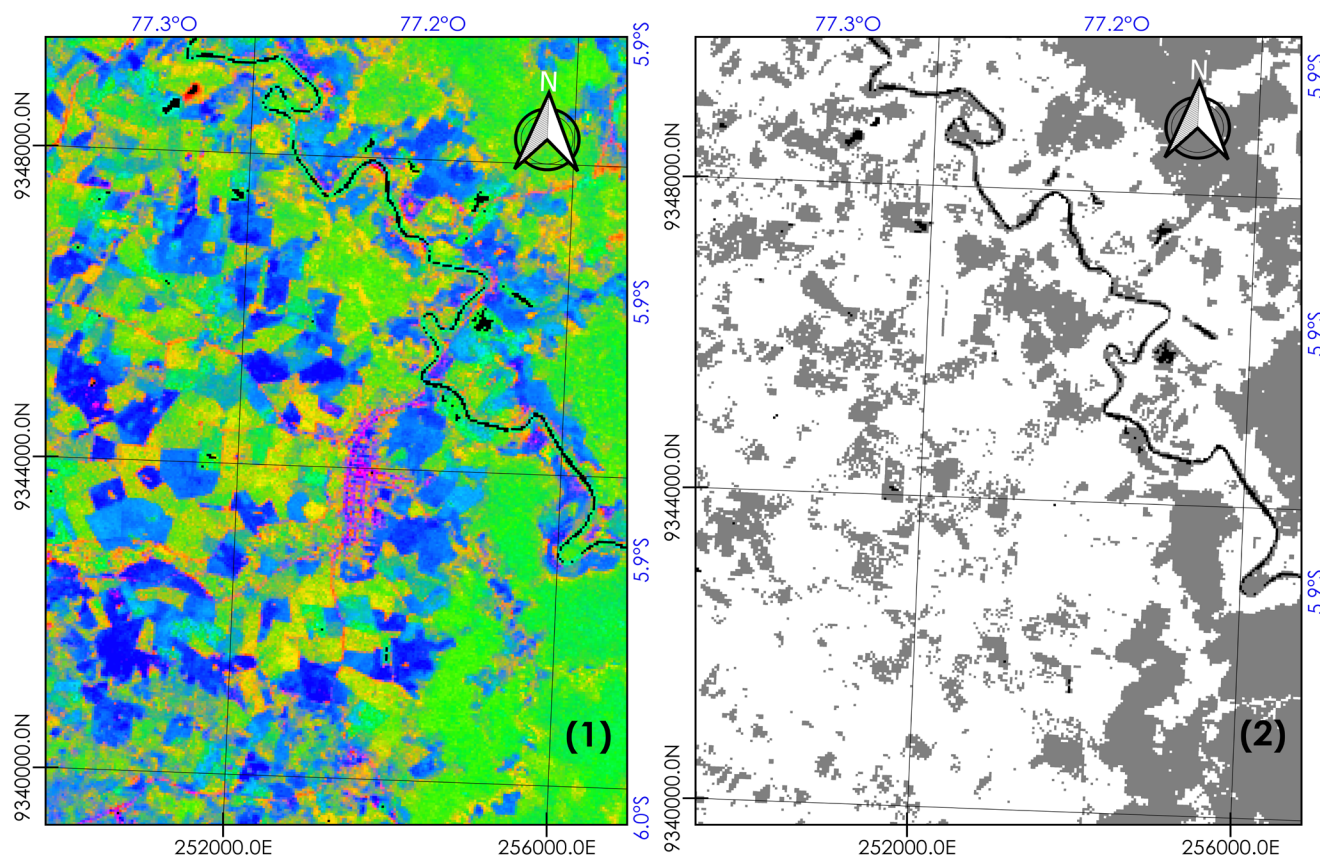


FIGURA 7. Cobertura fraccional y cobertura boscosa.

También se realizó la clasificación de cobertura boscosa, donde el principal insumo fue la imagen de cobertura fraccional (1), la cual sería convertida en una imagen de cobertura boscosa y no boscosa (2) (Fig. 7). Se clasificaron los patrones de la imagen mediante un árbol de decisión el cual convierte los resultados del AutoMCU en una estimación de la cobertura boscosa.

Bosque : $PV \geq 80 \wedge S < 20$

No bosque : $PV < 80 \vee S \geq 20$

Donde PV es la cobertura fraccional de vegetación fotosintética y S es el sustrato expuesto.

Entonces, un pixel con bosque casi siempre tiene un porcentaje de cobertura fraccional de 80 o más. Además de la condición de que PV sea mayor a 80, también está la

condición de que S sea menor a 20. El objetivo es evitar que la vegetación no boscosa se clasifique como bosque. La imagen de cobertura boscosa posee tres clases, los pixeles enmascarados se encuentran en negro, los pixeles de bosque en gris y los pixeles de áreas no boscosas en blanco (Fig. 7).

En el siguiente paso, se efectuó la detección de cambios en la cobertura de bosque, que fueron detectados utilizando un par de imágenes mediante un análisis multiimagen, que resulta ser el más apropiado para detectar la pérdida de bosque. Finalmente, se determinó la tasa anual de pérdida, comparando el área de cobertura boscosa de una misma área en 2 diferentes periodos para la subcuenca del río Yuracyacu. De acuerdo con lo mencionado por Puyravaud (2003) se determinó la tasa de deforestación (q) mediante la ecuación propuesta por la FAO:

$$q = \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^{1/(t_2 - t_1)} - 1$$

Donde:

A_1 = superficie de bosque al inicio del periodo

A_2 = superficie de bosque al final del periodo

t_1 = año de inicio del periodo

t_2 = año final del periodo

El inicio y final del periodo varía en función a las imágenes disponibles.

RESULTADOS

El análisis morfométrico permitió conocer los parámetros fisiográficos de la subcuenca a fin de describir su funcionamiento hidrológico (Tabla 2; Fig. 8).

Se determinaron las áreas de bosque mediante el análisis de cobertura fraccional a nivel subpixel utilizando las imágenes satelitales Landsat 5 para el periodo 1989-2010 (Tabla 3). La cobertura boscosa corresponde a la cobertura fotosintética del análisis de la cobertura fraccional (Fig. 9).

La deforestación en la subcuenca se expresa en el cambio que ha sufrido la cobertura boscosa desde el inicio del periodo de análisis (1989). Los valores obtenidos para este índice en esta investigación se presentan en la tabla 4.

Potenciales escenarios futuros

La disponibilidad de imágenes satelitales no fue ideal, por ejemplo, en los años 2015 y 2018 las escenas presentaron nubosidad y esto impedía realizar un análisis más preciso. Por lo que, a partir de las superficies de cobertura boscosa determinadas en la subcuenca (Tabla 3), se obtuvo un modelo de regresión lineal (Fig. 10), que permitió definir las potenciales áreas futuras de bosque húmedo tropical. De la correlación mostrada en la figura 10 (cobertura boscosa vs tiempo) se definió la ecuación de futuras áreas boscosas:

$$\text{Área boscosa} = -1.2048 \times (\text{Año}) + 2\,534.8$$

A partir de esta ecuación se determinaron los potenciales escenarios futuros de la cobertura boscosa en la subcuenca, en donde se observa la disminución progresiva de bosque tropical (Tabla 5).

TABLA 2. Parámetros fisiográficos

<i>Parámetros fisiográficos</i>		<i>Resultado</i>
Superficie	Área (A)	220.8 km ²
	Perímetro (P)	95.1 km
Forma	Factor de forma (Ff)	0.2
	Índice de Gravelius (Kc)	1.8
	Altitud media (Hm)	1643.2 m s.n.m.
Relieve	Pendiente media (S)	49.6%
	Índice de pendiente (Ip)	20%
Sistema de drenaje	Grado de ramificación	4° Orden

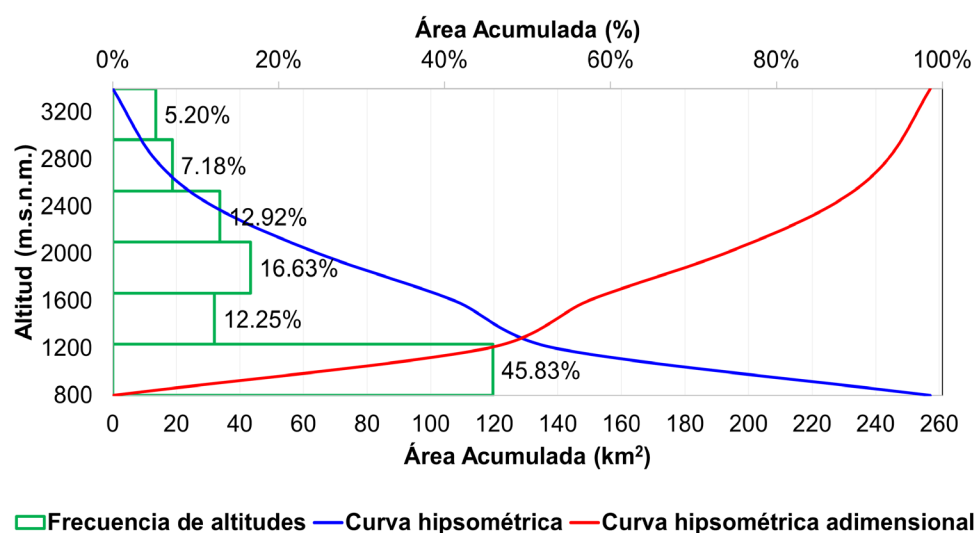


FIGURA 8. Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes de la subcuenca del río Yuracyacu.

TABLA 3. Variación de la cobertura boscosa.

Periodo*	Cobertura boscosa (km ²)	Variación de cobertura boscosa	% de superficie de bosque tropical
1989	141.4	***	64%
1995	123.2	-18.2	56%
2001	129.2	+6.0	56%
2006	120.3	-8.9	54%
2008	116.9	-3.4	53%
2010	109.4	-7.5	50%

* Las imágenes disponibles para estos años fueron elegidas en función a la poca nubosidad que presentaban.

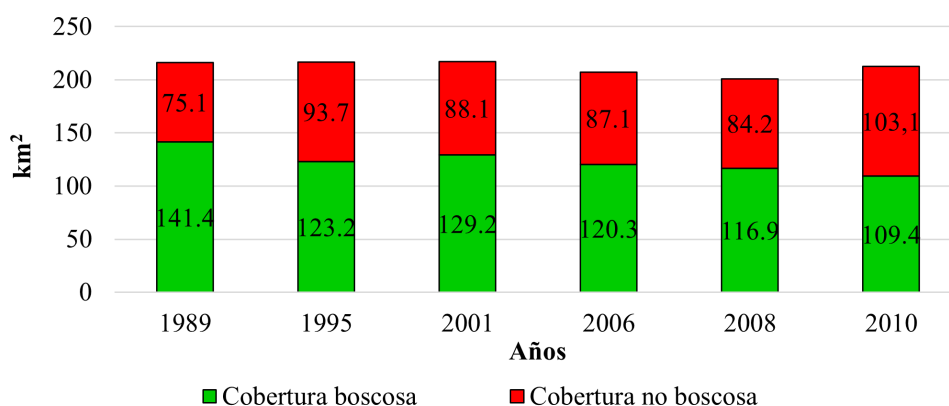


FIGURA 9. Evolución de las coberturas de la Subcuenca del río Yuracyacu 1989 - 2010.

TABLA 4. Tasa de deforestación.

<i>Periodo</i>	<i>q (anual)</i>
1989 - 1995	-0.0227
1995 - 2001	0.008
2001 - 2006	-0.0142
2006 - 2008	-0.0140
2008 - 2010	-0.0326
1989 - 2010	-0.0121

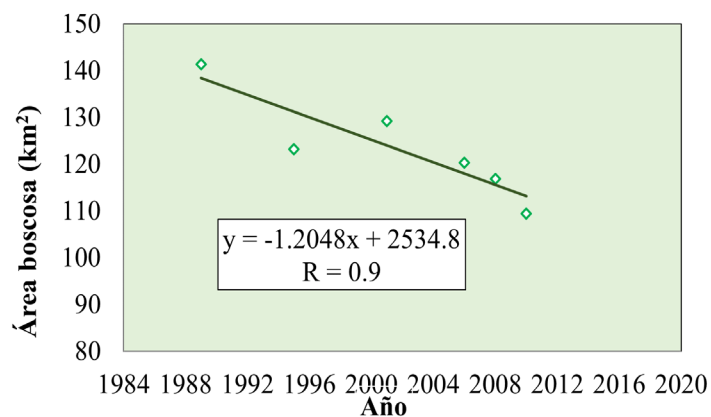


FIGURA 10. Correlación del área boscosa de la subcuenca del río Yuracyacu en el tiempo.

TABLA 5. Potenciales escenarios futuros de bosque tropical.

<i>Año</i>	<i>Bosque (km²)</i>	<i>Año</i>	<i>Bosque (km²)</i>	<i>Año</i>	<i>Bosque (km²)</i>
1989	138.5	2003	121.6	2017	104.7
1990	137.2	2004	120.4	2018	103.5
1991	136.0	2005	119.2	2019	102.3
1992	134.8	2006	118.0	2020	101.1
1993	133.6	2007	116.8	2021	99.9
1994	132.4	2008	115.6	2022	98.7
1995	131.2	2009	114.4	2023	97.5
1996	130.0	2010	113.2	2024	96.3
1997	128.8	2011	111.9	2025	95.1
1998	127.6	2012	110.7	2026	93.9
1999	126.4	2013	109.5	2027	92.7
2000	125.2	2014	108.3	2028	91.5
2001	124.0	2015	107.1	2029	90.3
2002	122.8	2016	105.9	2030	89.1



Se estimó el error del modelo de regresión lineal, con base en la superficie de bosque tropical determinada en el análisis de cobertura fraccional, mediante la siguiente ecuación:

$$E = \frac{B_g - B_{cf}}{B_{cf}} \times 100$$

Donde:

E = error expresado en porcentaje

B_g = superficie estimada por el modelo de regresión lineal

B_{cf} = superficie de bosque calculada por el análisis de cobertura fraccional

Se observó que los errores son menores a 10%, siendo 7% el error mayor para el año 1995 (Tabla 6).

Se consideró conveniente realizar las proyecciones de las áreas boscosas hasta el año 2030, debido a que hacer mayores proyecciones conlleva a incrementar el error de estimación.

Validación de resultados

Se evaluó la fiabilidad del análisis de la cobertura boscosa en la subcuenca con base en 195 puntos de verificación, seleccionados mediante la distribución binomial de probabilidad. Los puntos se establecieron con base en un

muestreo sistemático no alineado y fueron interpretados visualmente con una imagen de alta resolución del portal Google Earth.

En campo, se realizó el recorrido por la margen izquierda de la subcuenca para conocer el estado actual de los puntos establecidos, donde se identificaron problemas de quema, tala y desbroce de bosques. La evaluación se realizó el 27 de agosto de 2018 en coordinación con la División de Medioambiente de la Municipalidad Distrital de Nueva Cajamarca (Fig. 11). En la figura 11 se pueden observar píxeles en color rojo, que corresponden al sustrato expuesto; igualmente se distinguen los de color verde que corresponden a la vegetación fotosintéticamente activa y representan el bosque tropical de la subcuenca (parte alta de la cuenca). En la parte baja de la subcuenca en las proximidades de la red hídrica, cerca de la confluencia del río Yuracyacu con el río Mayo, pueden observarse píxeles de color azul hasta morados, lo que entra en la clasificación de vegetación no fotosintética hasta llegar al sustrato expuesto, es decir, corresponde a tierras que han sufrido cambio de uso de suelo. Finalmente, los píxeles con tonalidades amarillentas – anaranjadas se han identificado como tierras agrícolas o pasturas muy cerca de las localidades de La Florida en Nueva Cajamarca.

TABLA 6. Error generado por el modelo de regresión.

Año	Cobertura boscosa ¹ (km ²)	Cobertura boscosa ² (km ²)	Error
1989	141.4	138.5	-2%
1995	123.2	131.2	7%
2001	129.2	124.0	-4%
2006	120.3	118.0	-2%
2008	116.9	115.6	-1%
2010	109.4	113.2	3%

¹ Con base al análisis de cobertura fraccional.

² Con base al modelo de regresión.

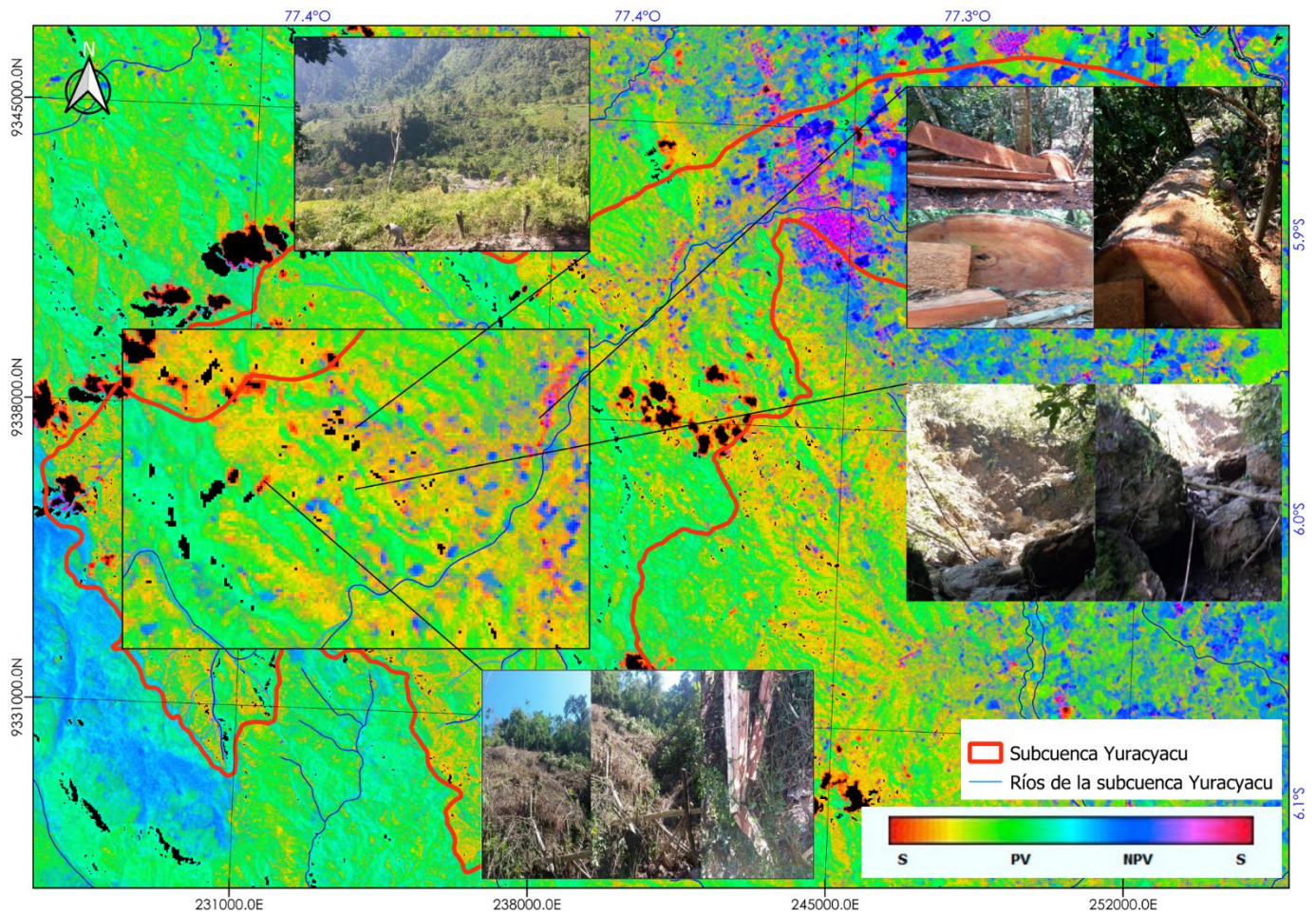


FIGURA 11. Verificación de áreas de pérdida de bosque del año 2018.

En la zona Alto Florida, como consecuencia de la deforestación de los bosques tropicales en la subcuenca del río Yuracyacu, también se identificaron problemas de erosión hídrica producto de las intensas lluvias, así como la quema de áreas para sembrar cultivos de café (Fig. 12).

Con los puntos de muestreo se elaboró la matriz de confusión: la diagonal de la matriz expresa el número de puntos de verificación en donde se produce el acuerdo entre las 2 fuentes utilizadas. Las columnas se agrupan en clases de referencia y las filas por las categorías deducidas de la evolución de las coberturas en la subcuenca del río Yuracyacu mediante el análisis de cobertura fraccional (Tabla 7). La diagonal de esta matriz expresa el número de puntos de verificación en donde se produce el acuerdo

entre la clasificación realizada por el análisis de cobertura fraccional y la imagen de alta resolución; los restantes suponen errores de asignación. Luego, la fiabilidad global (F) se calculó de la siguiente forma (Mendoza, 2012):

$$F = \frac{\text{Número de puntos correctamente asignados}}{\text{Números de puntos totales}} \times 100$$

$$F = \frac{(85 + 3 + 79)}{195} \times 100 = 86\%$$

Por otro lado, se determinó el índice Kappa (K) para delimitar el grado de ajuste por la exactitud de la clasificación, según la siguiente fórmula (Hudson y Ramm, 1987):



$$K = \frac{N * \sum X_{ij} - \sum X_i - X_{i+}}{N^2 + \sum X_{i+} - X_{i+}}$$

Donde

N = número total de observaciones

X_i = número de observaciones en la fila i y columna j

$X_{j+} - X_{+i}$ = totales marginales para el acuerdo esperado para la fila i y columna j

La validación del mapa del año 2010 resultó en un índice Kappa de 0.65 y la fiabilidad global fue 86%.

DISCUSIÓN

En la subcuenca del río Yuracyacu se calculó una superficie de 220.8 km², lo cual guarda relación con lo mencionado por Ortiz (2004), quien clasifica como subcuenca a las unidades hidrológicas de superficie entre 101 km² y 700 km². Su perímetro es de 95.1 km; al respecto, Gómez (1987) señala que su cuantificación es importante ya que influye en el tiempo de concentración. Su coeficiente de compacidad indica que la forma de la subcuenca se puede describir como oval alargada o alargada (Ortiz, 2004). Asimismo, su factor de forma igual a 0.2 indica que tiene poca tendencia de concentrar intensidades de lluvia (Villón, 2002).

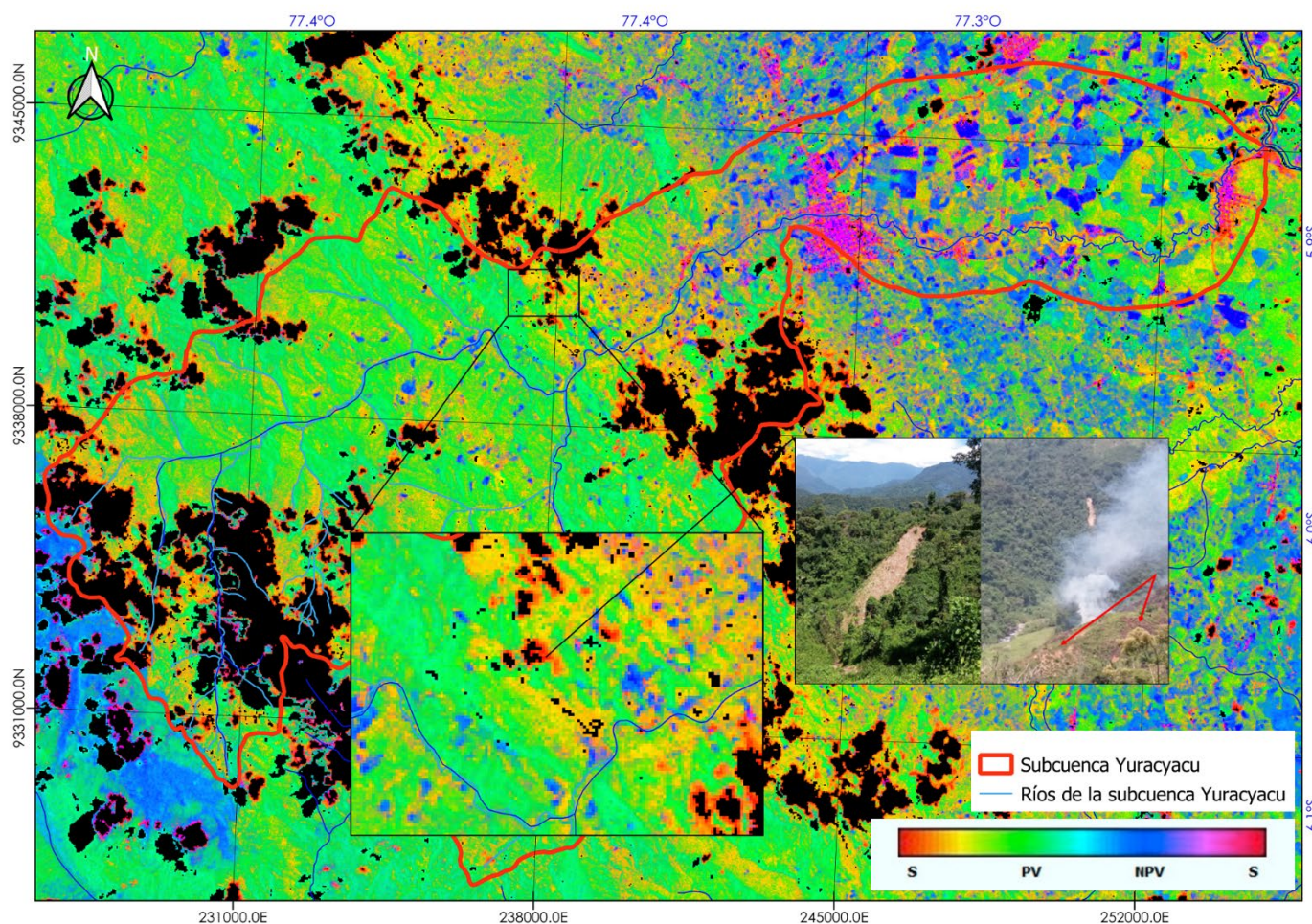


FIGURA 12. Imagen de cobertura fraccional del año 2010.

TABLA 7. Matriz de confusión.

<i>Clases</i>		<i>Imagen de alta resolución y visita de campo</i>			<i>Total</i>
		<i>C.B</i>	<i>C.E</i>	<i>C.nB</i>	
Clasificación	Cobertura boscosa	85	2	12	99
	Cobertura nubes	7	3	1	11
	Cobertura no boscosa	31	1	79	111
Total		123	6	92	195

C.B: Cobertura boscosa.; C.E: Cobertura enmascarada.; C.nB: Cobertura no boscosa.

Según Pérez (2015), el orden de una cuenca estará dado por el número de orden del cauce principal. La red hídrica se completó usando una imagen satelital Landsat 5 del año 2010 y la técnica de teledetección llamada combinación de bandas, teniendo en cuenta su dirección del drenaje; con ello, se obtuvo la red hídrica completa, que es de cuarto orden.

Respecto al bosque húmedo tropical de la subcuenca, la investigación permitió encontrar los resultados que se muestran en la tabla 3, evidenciando una disminución de la superficie de bosque amazónico con una tendencia lineal (Fig. 10). Al respecto, Condori-Luna, Loza y Solíz (2018); Tapia, Homeier, Espinoza, Leuschner y De la Cruz (2015); Ruiz, Cárdenas y Baquero (2011) muestran tendencias similares en bosques tropicales de la Amazonía de Bolivia, Ecuador y Colombia, respectivamente.

En el periodo de análisis, la cobertura boscosa mostró una reducción total de 32 km², con una tasa de 1.52 km²/año. En la figura 9 se aprecia la variación del bosque tropical para los distintos años evaluados a través de imágenes ópticas Landsat en CLASlite; se puede notar la disminución progresiva de la superficie de bosque. En el año 2001 se evidenció una ganancia de cobertura boscosa que puede ser atribuida a una recuperación de bosque secundario y a una menor superficie de nubes enmascaradas que se clasifican como cobertura no boscosa. Por otro lado, en las figuras 11 y 12 se muestra que en la subcuenca baja desde los 800 m hasta los 1100 m s.n.m., aproximadamente,

tiende a existir mayor superficie deforestada. Para comprender los procesos de deforestación se debe entender que en la subcuenca existen factores que condicionan su expansión demostrada en el análisis multitemporal realizado, tales como la agricultura y ganadería, identificados en la etapa de campo. Esto explicaría la deforestación que sucede en la subcuenca baja, que es similar en otros lugares de la Amazonía peruana (Minam, 2015, 2019).

Un estudio realizado por Gonzáles-Inca y Llanos-López (2015) determinó, para la subcuenca del río Yuracyacu, una cobertura boscosa de 137.05 km² y una deforestación de 4.75 km² para una evaluación realizada entre el periodo 2000-2013; sin embargo, en ese estudio no se menciona la metodología utilizada para la determinación de la cobertura boscosa.

Respecto a otras regiones de la Amazonía peruana, Rojas, Barboza, Maicelo, Oliva y Salas (2019) indican que la provincia de Rodríguez de Mendoza perdió 918 km² de cobertura boscosa en 29 años de análisis, Mendoza-Chichipe, Salas-López y Barboza-Castillo (2015), en el distrito de Leymebamba – Chachapoyas, encontró una alta deforestación en la temporada 1989-1998 calculando una disminución de bosque igual a 2.6 km²/año. En la presente investigación para el periodo de análisis 1989-2010, se calculó una disminución igual a 1.52 km²/año en la subcuenca del río Yuracyacu – región San Martín.



Asimismo, Laurente (2011) realizó un estudio en la microcuenca del río Supte – Tingo María, en el cual, mediante imágenes Landsat 5 – TM, cuantificó una reducción de bosque en razón igual a $0.34 \text{ km}^2/\text{año}$, equivalentes a 5.2 km^2 en 15 años. En la subcuenca del río Yuracyacu se calculó una disminución igual a $1.52 \text{ km}^2/\text{año}$ (152.3 ha/año), equivalentes a 32 km^2 (3200 ha) de cobertura de bosque tropical en 21 años. Por lo antes mencionado, se evidencia que existe una disminución progresiva de los bosques tropicales en diferentes zonas de la Amazonía peruana. Aunque, a escala global, la subcuenca Yuracyacu solo representa 0.02% de la Amazonía Peruana, a escala local es un afluente importante de la cuenca del río Mayo (8% de su superficie), debido a su importancia ambiental, ya que esta subcuenca boscosa produce el agua para el distrito de nueva Cajamarca, abasteciendo a 45 000 habitantes aproximadamente. La deforestación total de sus bosques provocaría que esta subcuenca se seque y afectaría a toda la población de este distrito. Esta continua reducción de bosques a escala local en Yuracyacu y en otras cuencas de la Amazonía peruana, generaría la pérdida de 68 000 000 ha de bosque tropical amazónico (Minam, 2016a) y una severa reducción de los servicios ambientales que proveen estas cuencas tales como el de regulación hídrica, mantenimiento de la biodiversidad, regulación del clima, entre otros.

La fiabilidad global de los mapas de cobertura boscosa fue 86% para las imágenes Landsat TM, este resultado se encuentra dentro de los límites aceptables usados en estudios donde se emplean técnicas de teledetección en la interpretación de imágenes de satélite (Osorio, Mas, Guerra y Maass, 2015).

La imagen de referencia tomada de Google Earth no correspondía exactamente a la fecha de las imágenes Landsat utilizadas en el análisis, por lo cual es probable que exista cierto grado de subestimación de la fiabilidad de los mapas, sin embargo, en el trabajo de campo se evidenció la pérdida de cobertura boscosa en las áreas seleccionadas para el análisis. Asimismo, el coeficiente Kappa encontrado fue de 0.65 lo que indica una concordancia considerable o sustancial de la clasificación (Landis y Koch, 1977).

CONCLUSIONES

La subcuenca del río Yuracyacu posee un área de drenaje de 220.8 km^2 y perímetro de 95 km . Es de forma alargada ($K_c = 1.8$ y $F_f = 0.2$), con poca probabilidad de que sea cubierta en su totalidad por una tormenta, permitiendo la evacuación de las crecientes a través de sus lechos fluviales y produciendo erosión. Sus límites altitudinales van desde los 800 m hasta 3400 m s.n.m. y su altitud media es de 1643.2 m . La forma de su curva hipsométrica manifiesta una fase de madurez. Su índice de pendiente de 20% y su pendiente media de 49.3% indican que posee terreno escarpado. La red de drenaje de la subcuenca es de orden 4, posee aproximadamente 38 ríos de orden 1, que son las quebradas que se encuentran en la parte alta de la subcuenca.

La evaluación de la cobertura boscosa en la subcuenca del río Yuracyacu mediante el análisis de la cobertura fraccional y la técnica SIG permitió calcular una pérdida total de bosque igual a 32 km^2 que es 15% del área de la subcuenca, reflejando cambios en su cobertura. El periodo donde se produjo la mayor pérdida fue entre 1989-1995, igual a 18.2 km^2 de bosque tropical a una tasa de $3.03 \text{ km}^2/\text{año}$: para el periodo 2001-2006 la variación fue de 8.9 km^2 , para los años 2006-2008 la variación fue de 3.4 km^2 , finalmente para el periodo 2008-2010 fue de 7.5 km^2 . La tasa de deforestación estimada mediante la ecuación propuesta por FAO fue 1.21% anual en la subcuenca del río Yuracyacu en los 21 años de análisis.

El modelo para evaluar los escenarios futuros del bosque tropical de la subcuenca del río Yuracyacu determinó 89.1 km^2 de cobertura boscosa para el año 2030 equivalente a 63% del área boscosa calculada para el año 1989, lo que demuestra su progresivo retroceso, debido a la agricultura migratoria que se genera principalmente en el distrito Nueva Cajamarca, en los caseríos de La Florida y Alto Florida con las plantaciones de café y arroz que se identificaron en el trabajo de campo, lo cual está asociado a cambios de uso de suelo y puede tener repercusiones en la producción de agua en la parte alta de la subcuenca e incrementar los riesgos de inundación en la parte baja.

REFERENCIAS

- Asner, G. P., Knaap, D. E., Balaji, A., & Perez-Acosta, G. (2009). Automated mapping of tropical deforestation and forest degradation: CLASlite. *Journal of Applied Remote Sensing*, 3, 033543. doi: 10.1117/1.3223675
- Autoridad Nacional del Agua [ANA] (2018). *Una mirada a la naturaleza: Agua y bosque*. Lima: Ministerio de Agricultura y Riego.
- Bruijnzeel, L., Scatena, F., & Hamilton, L. (2010). *Tropical montane cloud forest*. Cambridge University Press.
- Campos Aranda, D. F. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico*. San Luis Potosí: Universidad Autónoma San Luis de Posotí.
- Chuvieco, E. (2010). *Teledetección Ambiental*. Barcelona: Planeta S.A.
- Condori-Luna, I. J., Loza-Murguía, M. G., Mamani-Pati, F., & Solíz-Valdivia, H. (2018). Análisis multitemporal de la cobertura boscosa empleando la metodología de teledetección espacial y SIG en la subcuenca del río Coroico - provincia Caranavi en los años 1989 – 2014. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 9(1), 25 - 44.
- Cordero, D. (2011). *Los bosques en América Latina*. Pucará: Fundación Friedrich Ebert, FES-ILDIS.
- Déborah, B. (2014). *Claslite: Tecnología para el manejo de bosques - Guía de usuario versión 3.2 Español*. Stanford, Estados Unidos de América: Instituto CARNEGIE.
- Diario Gestión. (4 de agosto de 2018). *Economía*. Obtenido de <https://gestion.pe/economia/amazonia-peruana-pierde-23-000-hectareas-bosques-primer-semester-240567-noticia/>
- Food and Agriculture Organization [FAO] (2009). *Los bosques y el agua*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Food and Agriculture Organization [FAO] (2012). *Guía para la aplicación de normas fitosanitarias en el sector forestal*. Italia, Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Food and Agriculture Organization [FAO] (2015). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Food and Agriculture Organization [FAO] (2016). *Bosques y cambio climático. Documento de trabajo 14*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Food and Agriculture Organization [FAO] (2020). *Global forest resources assessment 2020*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Geist, Helmut J., & Lambin, Eric F. (2002) Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation: Tropical forests are disappearing as the result of many pressures, both local and regional, acting in various combinations in different geographical locations. *BioScience*, 54(2), 143-150. doi:10.1641/0006-3568(2002)052[0143:PCAUDF]2.0.CO;2
- Gómez Lora, J. W. (1987). *Primer curso nacional de recursos hídricos*. Lima: Universidad Nacional Federico Villarreal.
- González-Inca, C., & Llanos-López, R. (2015). *Evaluación de los efectos de la deforestación en la hidrología y pérdida lateral de carbono orgánico del suelo de la cuenca del Altomayo*. Lima: Infobosques.
- Hansen, M., Potapov, R., Moore, M., Hancher, S., Turubanova, A., & Tykavina, D. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science* 342, 850-853. doi: 10.1126/science.1244693
- Hassan, R., Scholes, R., & Ash, N. (2005). Ecosystems and human well-being: current state and trends, millennium ecosystem assessment series. *Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends*, 1, 47.
- Heras, Rafael (1976). *Hidrología y recursos hidráulicos*. Madrid: Centro de Estudios Hidrográficos.
- Houghton, R. A. (2012). Carbon emissions and the drivers of deforestation and forest degradation in the tropics. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 597-603. doi: 10.1016/j.cosust.2012.06.006
- Hudson, W. D., & Ramm, C. W. (1987). Correct formula of the kappa coefficient of agreement. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53, 421-422.
- Iniciativa de Conservación del Alto Mayo [ICAM] (2011). *Estrategia de intervención de la iniciativa de conservación del bosque de protección del alto mayo*. Lima: Ministerio del Ambiente.
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2007). *Climate Change 2007 The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Reino Unido: Cambridge University Press.
- Landis, R., & Koch, G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *biometrics*, 3(1), 159-174. doi: 10.2307/2529310
- Laurente Cajacuri, M. (2011). Medición de la deforestación mediante percepción remota en la microcuenca río Supte, Tingo María - Perú. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 11, 1-15.
- Mendoza-Chichipe, M. E.; Salas López, R., & Barboza Castillo, E. (2015). Análisis multitemporal de la deforestación usando la clasificación basada en objetos, distrito de Leymebamba (Perú). *INDES*, 3(2), 67-76. doi: 10.25127/indes.201502.008



- Mendoza Robles, J. R. (2012). *Determinación de áreas deforestadas por actividades humanas en la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata y el Parque Nacional Bahuaja Sonene - Madre de Dios*. Madre de Dios: Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios.
- Ministerio de Educación [Minedu] (2018). *Estadística de la Escala Educativa*. Recuperado de <http://sigmed.minedu.gob.pe/> descargas/
- Ministerio del Ambiente [Minam] (2015). *Cuantificación y análisis de la deforestación en la Amazonía Peruana en el periodo 2010-2011-2013-2014*. Lima: Dirección General de Ordenamiento Territorial.
- Ministerio del Ambiente [Minam] (2016a). *La Conservación de bosques en el Perú 2011 - 2016: Conservando los bosques en un contexto de cambio climático como aporte al crecimiento verde*. Lima: Programa Nacional de Conservación de Bosques para la Mitigación del Cambio Climático.
- Ministerio del Ambiente [Minam] (2016b). *Un pacto por el bienestar del planeta*. Lima: Repositorio del Ministerio del Ambiente: <http://siar.minam.gob.pe/apurimac/documentos/ambiente-accin-rutas-crecimiento-sostenible>
- Ministerio del Ambiente [Minam] (2017). *Programa Nacional de Conservación de Bosques para la Mitigación del Cambio Climático* (09 de agosto de 2017). Recuperado de <http://www.bosques.gob.pe/peru-pais-de-bosques>
- Ministerio del Ambiente [Minam] (2019). *Apuntes de bosque: Cobertura y deforestación de los bosques húmedos amazónicos 2018*. Lima: Programa Nacional de Conservación de Bosques para la mitigación del Cambio Climático.
- National Research Council [NRC] (2014). *Advancing land change modeling: opportunities*. Washington, DC: The National Academies Press. doi:10.17226/18385
- Neary, D., Ice, G., & Jackson, C. (2009). Linkages between forest soils and water quality and quantity. *Forest Ecology and Management*, 258(10), 2269-2281. doi: 10.1016/j.foreco.2009.05.027
- Nepstad, D. C., Stickler, C. M., Soares-Filho, B., & Merry, F. (2008). Interacciones entre el uso del suelo, los bosques y el clima en el Amazonas: perspectivas de un punto de inflexión en el bosque a corto plazo. *Transacciones filosóficas de la Royal Society Biological Sciences*, 363(1498), 1737-1746.
- Ortiz Vera, O. (2004). Evaluación hidrológica. *Hidrored*, 1, 1-7.
- Osorio, L., Mas, J.-F., Guerra, F., & Maass, M. (2015). Análisis y modelación de los procesos de deforestación: Un caso de estudio en la cuenca del río Coyoquilla, Guerrero, México. *Investigaciones geográficas* (88), 60-74. doi: 10.14350/rig.43853
- Perez Campomanes, G. (2015). *Civilgeeks*. Recuperado de <https://civilgeeks.com/2015/08/28/manual-de-hidrologia-aplicada-ing-giovene-perez-campomanes/>
- Puyravaud, J. P. (2003). Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 593-596. doi: 10.1016/S0378-1127(02)00335-3
- Rojas Briceño, N. B., Barboza Castillo, E., Maicelo Quintana, J. L., Oliva Cruz, S. M., & Salas López, R. (2019). Deforestación en la Amazonía peruana: Índices de cambios de cobertura y uso del suelo basado en SIG. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 81(2538), 1-34. <http://dx.doi.org/10.21138/bage.2538a>
- Ruiz, J., Cárdenas, W., & Baquero, C. (2011). Deforestación y dinámica del bosque secundario en la Amazonía colombiana 1986-2000. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 35(137), 531-545.
- Soares-Filho, B. S., Nepstad, D. C., Curran, L. M., Cerqueira, G. C., García, R. A., & Ramos, C. A. (2006). Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature*, 440, 520 - 523. doi: 10.1038/nature04389
- Tapia-Armijos, M. F., Homeier, J., Espinosa, C. I., Leuschner, C., & De la Cruz, M. (2015). Deforestation and forest fragmentation in South Ecuador since the 1970s – Losing a hotspot of biodiversity. *PLoS ONE*, 10(9), e0133701. doi:10.1371/journal.pone.0133701
- Turner, A., Meyer, W. B., & Skole, D. L. (1994). Global land-use/land-cover change: towards an integrated study. *Ambio*, 23, 91-95.
- Vermote, E. F., Tange, D., Deuze, J. L., Herman, M., & Morcette, J. J. (1997). Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(3), 675-686. doi: 10.1109/36.581987
- Villón Vejar, M. (2002). *Hidrología* (1a ed.). Lima: Editorial Villón.

Manuscrito recibido el 22 de enero de 2020

Aceptado el 05 de enero de 2021

Publicado el 22 de diciembre de 2021

Este documento se debe citar como:

Gómez-Lora, J. W., Gallo-Ramos, V. H. y Camacho-Zorogastúa, K. del C. (2021). Evaluación del bosque húmedo tropical mediante el análisis de la cobertura fraccional y técnicas SIG en la subcuenca del río Yuracyacu, Amazonía peruana. *Madera y Bosques*, 27(2), e2722109. doi: 10.21829/myb.2021.2722109



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual 4.0 Internacional.

