

PROTOCOLO DE CLASIFICACIÓN DE PÉRDIDA DE COBERTURA EN LOS BOSQUES HÚMEDOS AMAZÓNICOS ENTRE LOS AÑOS 2000 y 2011

Con el apoyo de:





AUTORIDADES DEL MINISTERIO DE
AGRICULTURA Y RIEGO

Juan Manuel Benitez Ramos
Ministro de Agricultura y Riego

César Francisco Sotomayor Calderón
Viceministro de Políticas Agrarias

Fabiola Muñoz Doderó
Directora General Forestal y de Fauna Silvestre
y (e) Directora Ejecutiva del SERFOR

AUTORIDADES DEL MINISTERIO DEL
AMBIENTE

Manuel Pulgar-Vidal Otálora
Ministro del Ambiente

Gabriel Quijandría Acosta
Viceministro del Viceministerio de desarrollo
estratégico de los recursos naturales

Gustavo Suárez de Freitas Calmet
Asesor VMDERN y (e) Coordinador Ejecutivo del
Programa Nacional de Conservación de Bosques
para la Mitigación del Cambio Climático



INTEGRANTES DEL EQUIPO TÉCNICO

Equipo Técnico del MINAGRI

Beatriz Dapozzo Ibáñez | Lenin Cruyff Ventura Santos | Noemí Serrudo Torobeo

Equipo Técnico MINAM

Christian Vargas Gonzáles | Eduardo Jesús Rojas Báez | Natalia Málaga Durán
Renzo Giudice Granados | Brian Zutta Salazar | Laura Secada Daly

Equipo de la Sala de Observación Perú-OTCA

Ethel Rubín De Celis Llanos | Rocío Malleux Hernani

Apoyo Técnico en Revisión

Daniel Castillo Soto | Hubert Portuguez Yactayo | Gustavo Huamaní Castro
Giovanna Orcotoma Escalante | Ybelia Jara Flores

Asistencia SIG-Proyecto REDD+

Andrea Calderón-Urquiza Carbonel | Victoria Espinoza Mendoza

Asesoramiento Técnico-Científico

Matthew Hanssen | Peter Potapov | Jan Dempewolf

Autores

Christian Vargas Gonzáles | Eduardo Rojas Báez | Daniel Castillo Soto | Victoria Espinoza Mendoza
Andrea Calderón Urquiza Carbonel | Renzo Giudice Granados | Natalia Málaga Durán

Colaboradores

Ethel Rubín De Celis Llanos | Rocío Malleux Hernani | Beatriz Dapozzo Ibáñez
Lenin Cruyff Ventura Santos | Noemí Serrudo Torobeo | Hubert Portuguez Yactayo
Gustavo Huamaní Castro | Eddy Mendoza Rojas | Matthew Hanssen | Peter Potapov
Jan Dempewolf | Brian Zutta Salazar

Coordinación

Renzo Giudice Granados | Beatriz Dapozzo Ibáñez | Gustavo Huamaní Castro
Rocío Malleux Hernani

Cuidado de edición, diseño y diagramación: Alicia Infante Takey

ÍNDICE

1.	Introducción	9
2.	Datos utilizados	11
2.1.	Landsat-ETM+	11
2.2.	Datos auxiliares	12
	2.2.1. Sensor MODIS (<i>The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>)	12
	2.2.2. SRTM (<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>)	13
	2.2.3. Hidrografía	13
3.	Procesamiento de imágenes	14
3.1.	Corrección geométrica y reproyección de datos	14
3.2.	Calibración de datos	14
3.3.	Evaluación de la calidad	15
3.4.	Normalización de datos	16
3.5.	Salida de datos	17
3.6.	Creación de métricas	17
	3.6.1. Métricas anuales del año 2000 y 2011	18
	3.6.2. Métricas basadas en rangos	20
	3.6.3. Métricas de análisis de tendencias	21
3.7.	Proceso de clasificación	22
	3.7.1. Clasificación de Bosque/No bosque	23
	3.7.2. Clasificación de pérdida de cobertura boscosa entre los años 2000-2011	25
3.8.	Posproceso	28
	3.8.1. Aguajales	29
	3.8.2. Herbazales	31
	3.8.3. Pacales	32
	3.8.4. Capa de pérdida de bosques (2000-2011)	33
3.9.	Evaluación de la precisión	35
4.	Conclusiones	36
5.	Bibliografía	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Bandas espectrales en imágenes Landsat-ETM+	11
Tabla 2:	Factores de escala (g)	17
Tabla 3:	Criterios para la clasificación de pérdida de cobertura boscosa	26
Tabla 4:	Matriz de confusión	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Comparación de las bandas espectrales del sensor Landsat	12
Figura 2:	Producto MOD44C con cobertura global producido por la Universidad de Maryland	13
Figura 3:	Árbol de decisión para la detección de nubes, sombras, neblina y agua	15
Figura 4:	Composición de métricas anuales	18
Figura 5:	Distribución de píxeles por año	19
Figura 6:	Métricas que representan el mínimo, el máximo, y los percentiles 10 %, 25 %, 50 %, 75 % y 90 % generados a partir de los datos Landsat-ETM+	20
Figura 7:	Métricas basadas en rangos utilizadas principalmente en la detección de pérdida de cobertura de bosques.	21
Figura 8:	Flujo de trabajo para el proceso de clasificación de Bosque/No bosque y pérdida de cobertura boscosa.	22
Figura 9:	Coberturas de vegetación visualizadas desde la combinación RGB543 y firmas espectrales.	23
Figura 10:	Muestras de entrenamiento (Bosque/No bosque)	24
Figura 11:	Iteraciones realizadas para la obtención de la capa de bosque en un sector del departamento de Loreto.	25
Figura 12:	Imágenes base utilizadas para la creación de muestras de entrenamiento del año 2000 y 2011.	26
Figura 13:	Composición de cambio y creación de áreas de entrenamiento para la clasificación de pérdida y no pérdida de cobertura de bosques.	27
Figura 14:	Resultados de pérdida de cobertura boscosa	27
Figura 15:	Capa de pérdida anual para las áreas afectadas por minería informal en el departamento de Madre de Dios.	28
Figura 16:	Aguajales vistos desde la composición de métricas del año 2000 (comp_2000)	29
Figura 17:	Aguajales vistos con distintos tipos de realce	29
Figura 18:	Umbrales evaluados para la obtención de suelo permanente	30
Figura 19:	Capa de bosque en áreas de aguajales localizados al oeste del departamento de Loreto	31
Figura 20:	Capa final de bosque en áreas con presencia de herbazal en el departamento de Pucallpa	31
Figura 21:	Métrica MedFirst (año 2000) muestra el bosque de pacal localizado entre los departamentos de Cusco y Madre de Dios	32
Figura 22:	Vista de la corrección manual realizada en los bosques de pacales	33
Figura 23:	Capa de pérdida de cobertura boscosa en el departamento de Loreto	33
Figura 24:	Comparación visual entre el resultado de pérdida de cobertura boscosa y la información satelital disponible	34



INTRODUCCIÓN

El mecanismo de Reducción de Emisiones derivadas de la Deforestación y Degradación Forestal, el rol de la conservación de los bosques, el manejo forestal sostenible y las mejoras en las reservas de carbono forestal en países en desarrollo (REDD+) son herramientas de lucha contra la deforestación, las cuales buscan reducir las emisiones derivadas de las actividades del ser humano en los bosques.

Uno de los componentes del Mecanismo REDD+ Nacional en el Perú es el Sistema de Medición, Reporte y Verificación (MRV) de las emisiones de origen antrópico relacionadas con los bosques, absorción por sumideros, reservas forestales de carbono y cambios en la superficie forestal. Para que éstos sean cuantificados es preciso contar con estimados confiables de la extensión del bosque y de las tendencias de la pérdida de la cobertura boscosa.

En un marco más amplio de interés nacional, el monitoreo de la cobertura boscosa es parte del engranaje de un esquema de acción global, nacional y regional, cuya finalidad principal es la conservación de los bosques mediante el monitoreo eficiente de los mismos, así como la prevención y reducción de la deforestación, la degradación y, por consiguiente las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera. El manejo forestal sostenible, la implementación de sistemas agroforestales, el establecimiento y la gestión de Áreas Naturales Protegidas (ANP) son algunos ejemplos de actividades realizadas para lograr este fin. Estas valiosas iniciativas requieren contar con información actual, permanente, oportuna, transparente y confiable sobre el monitoreo de los bosques para hacer una gestión adecuada de los mismos.

El monitoreo de bosques tropicales utilizando imágenes Landsat ya ha sido reportado (Broich *et al.*, 2011; Killeen *et al.*, 2007; P. Potatov *et al.*, 2012) y reflejó que la principal limitante para el análisis con imágenes provenientes de sensores ópticos es la presencia de cobertura nubosa. Este problema se superó utilizando los mejores píxeles de todas las escenas Landsat-ETM+ disponibles para el periodo en estudio. La metodología empleó más de 11 000 escenas Landsat-ETM+ obtenidas de todo el territorio peruano entre los años 1999 y 2011; y utilizó como información de entrada las bandas 3, 4, 5, 7 el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Normalized Band Ratio* (NBR) y más de 500 métricas o variables estadísticas creadas, utilizando las bandas mencionadas anteriormente.

El método de clasificación supervisada utilizado para la clasificación de coberturas fue desarrollado por la Universidad de Maryland y se basa en un “árbol de decisiones”. El algoritmo de clasificación utiliza solo dos tipos de muestras o áreas de entrenamiento (Bosque/ No bosque o Pérdida/No pérdida) que se realizan de manera manual en el entorno del módulo FOCUS de PCI geomática. Finalmente el algoritmo se ejecutó en el módulo EASY de PCI geomática.

En el presente documento se consigna la metodología ejecutada para cuantificar la cobertura de bosques húmedos amazónicos en el año 2000 y la pérdida que estos sufrieron durante el periodo 2000-2011. Esta información puede ser utilizada para la construcción de niveles de referencia de bosque y el análisis de las tendencias de la deforestación.

2. Datos utilizados

2.1. Landsat-ETM+

Para realizar el análisis y mapeo de cobertura de Bosque/No bosque para el año 2000 y la pérdida entre los años 2000 al 2011, se utilizaron imágenes Landsat-ETM+, tomadas entre los años 1999 y 2011. Las mismas están disponibles en el Earth Resources Observation and Science Center (EROS) del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Se utilizaron 11 654 imágenes Landsat-ETM+ producto LIT. Solo las bandas 3, 4, 5 y 7 fueron normalizadas y utilizadas para la generación de métricas (tabla 1).

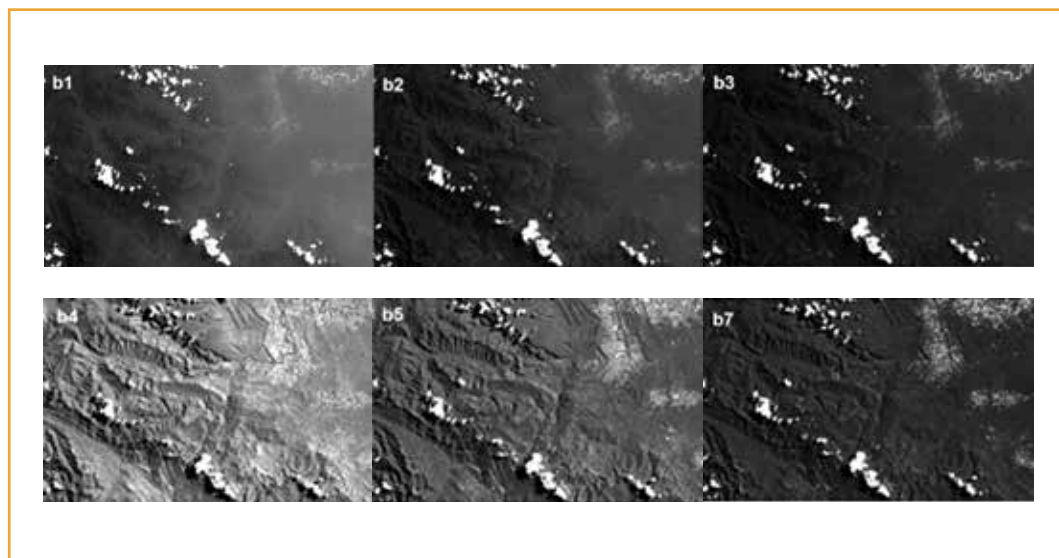
TABLA 1
Bandas espectrales en imágenes Landsat-ETM+

Bandas Landsat	Rango Espectral (μm)
Banda 1 (Azul)	0,452-0,518
Banda 2 (Verde)	0,528-0,609
Banda 3 (Rojo)	0,626-0,693
Banda 4 (NIR)	0,776-0,904
Banda 5 (SWIR)	1,567-1,784
Banda 6 (Termal)	10,450-12,420
Banda 7 (SWIR)	2,097-2,349
Banda 8 (Pancromático)	0,520-0,900

Fuente: Proyecto REDD+ MINAM.

Se excluyeron las bandas 1 (azul) y 2 (verde) de las imágenes Landsat pues presentaban ruido debido a las condiciones atmosféricas típicas de las áreas tropicales. Siendo necesario tener una banda con información en el espectro visible se escogió utilizar la banda 3, la menos afectada por las condiciones atmosféricas. Ver figura 1.

FIGURA 1
Comparación de las bandas espectrales del sensor Landsat



Se observa que las bandas azul (b1) y verde (b2) son las más afectadas por las condiciones atmosféricas, mientras las bandas con longitudes de onda más largas (b3, b4, b5 y b7) este efecto es menor. Fuente: Proyecto REDD+ MINAM.

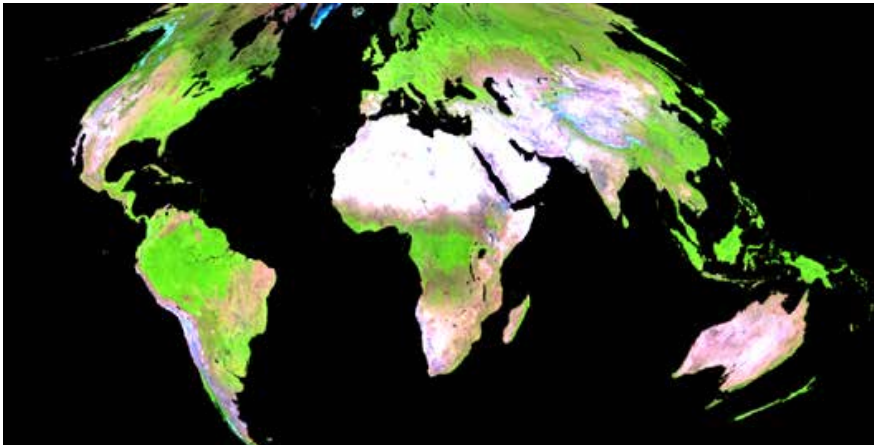
2.2. Datos auxiliares

2.2.1. Sensor MODIS (*The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*)

El conjunto de datos de métricas derivadas de MODIS se utilizó para la normalización de datos Landsat-ETM+ (ver sección 3.4). Las métricas de MODIS se crearon utilizando información capturada entre los años 2000 y 2010. El producto MODIS utilizado para la creación de las métricas fue el MOD44C y es producido por la Universidad de Maryland (Carroll *et al.*, 2010). El producto MOD44C tiene 7 bandas (1-7) remuestreadas a 250 m y utiliza como insumo el producto MOD09 (reflectancia de superficie). Ver figura 2.

FIGURA 2

Producto MOD44C con cobertura global producido por la Universidad de Maryland



Fuente: Potapov *et al.*, 2013.

2.2.2. SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*)

Los datos de altitud y pendiente, derivados del *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) de la NASA, forman parte de las métricas utilizadas en la clasificación. Los datos SRTM fueron descargados de <http://srtm.csi.cgiar.org> y tienen 90 m de resolución espacial; fueron re-proyectados para luego realizar un remuestreo de los píxeles a 30 m que coincidiera con la proyección utilizada y con la resolución espacial de las imágenes Landsat-ETM+.

2.2.3. Hidrografía

Se realizó una clasificación supervisada que mapeó la red hídrica para los años 2000 y 2011. Los resultados de la misma tuvieron un proceso de edición manual y los ríos que no pudieron ser mapeados mediante la clasificación supervisada fueron digitalizados manualmente. La mayoría de estos ríos posee un lecho \pm un píxel (30 m). La hidrografía fue utilizada como capa adicional a las de Bosque/No bosque y pérdida de cobertura de bosques.

3. Procesamiento de imágenes

3.1. Corrección geométrica y reproyección de datos

Como se mencionó anteriormente, el nivel de procesamiento de los datos Landsat-ETM+ utilizado fue el LIT, el cual se caracteriza por estar rectificado geoméricamente y libre de distorsiones relacionadas con el sensor. Las escenas Landsat-ETM+ tienen proyección UTM y fueron reproyectadas a la proyección sinusoidal (meridiano central-60° W).

3.2. Calibración de datos

Los niveles digitales (ND) de las imágenes crudas fueron calibrados a valores de reflectancia al tope de la atmosfera (TOA) y temperatura de brillo (Banda termal 6-2). La corrección se realizó utilizando el enfoque descrito por Chander *et al.* (2009) con coeficientes tomados de los metadatos. Primero se hizo la conversión a valores de radiancia, utilizando la siguiente ecuación:

L (Radiancia) = Ganancia * Nivel digital + Sesgo

Luego se calibra a valores de reflectancia utilizando la siguiente fórmula:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos \theta_s}$$

Dónde:

P_{λ} = Reflectancia al tope de la atmosfera.

π = Hipótesis de blanco lambertiano.

L_{λ} = Radiancia total medida por el satélite.

d^2 = Distancia de la Tierra al Sol en unidades astronómicas, y d se calcula como:

$d = 1 - 0,0167 \cos (2\pi (\text{día juliano}-3)/365)$.

$ESUN_{\lambda}$ = Irradiancia solar espectral a tope de la atmósfera (watts/m²* μm).

$\cos \theta_s$ = Coseno del ángulo cenital solar.

La banda termal (6-2) fue calibrada a valores de temperatura de brillo utilizando la siguiente fórmula:

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_\lambda} + 1\right)}$$

Dónde:

T = Temperatura de brillo

$K2$ = 1282,7 K

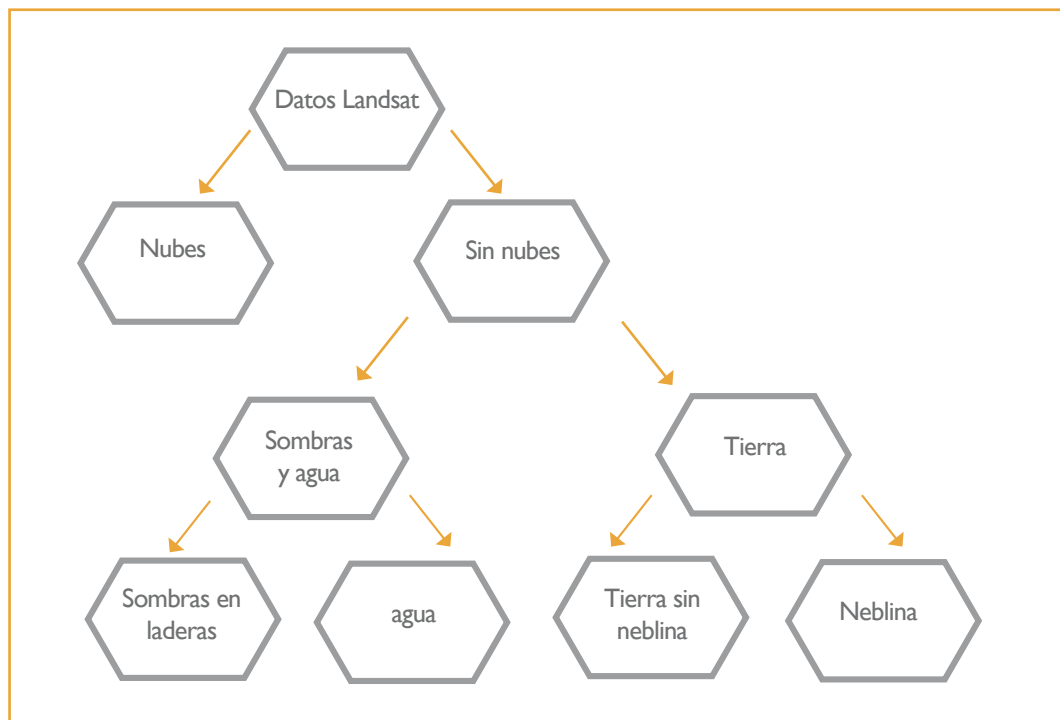
L_λ = Radiancia del sensor

$K1$ = 666,9 Wn-2 sr-1 μ m-1

Toda la información calibrada pasó por una etapa de evaluación de la calidad.

3.3. Salida de datos

FIGURA 3
Árbol de decisión para la detección de nubes, sombras, neblina y agua



Fuente: modificado de Potapov *et al.*, 2013.

Para la evaluación de la calidad (EC) se utilizaron todas las bandas espectrales del sensor Landsat y se analizó píxel por píxel con un grupo de modelos de “árbol de decisiones” que detectan nubes, sombras, neblina atmosférica y agua (ver figura 3).

Los umbrales utilizados para la detección de estos tipos de coberturas fueron derivados de los datos de entrenamiento recopilados a lo largo del bioma tropical. Para coleccionar datos de entrenamiento, se seleccionaron un grupo de imágenes Landsat-ETM+ en diferentes partes de los bosques tropicales, se clasificaron las clases: tierra, agua, nube, neblina y sombra. Del grupo de imágenes, se seleccionó al azar el 10 % de las muestras y fue usado para crear modelos generales de árbol de clasificación. Cada modelo fue aplicado para cada escena Landsat-ETM+ produciendo valores probabilísticos para las clases de nubes, sombras y agua. Basado en estos valores se asignó a cada píxel un código de evaluación de calidad (EC) el cual refleja la probabilidad de que un píxel sea observado como tierra o agua libres de nubes. Este método es descrito por Potapov *et al.* (2012). Esta información fue utilizada para la normalización y posterior creación de métricas.

3.4. Normalización de datos

Las escenas Landsat-ETM+ tienen variaciones de reflectancia debido a varios factores: la anisotropía de la superficie, los ángulos de iluminación, la adquisición de la información y las condiciones atmosféricas en que las imágenes fueron tomadas, entre otros. Para corregir estos problemas se realizó una normalización de datos utilizando imágenes MODIS (Potapov *et al.*, 2012).

Los productos MOD44C de MODIS fueron utilizados para la normalización de las imágenes Landsat-ETM+. Se calculó una media del sesgo entre la reflectancia de superficie de MODIS y la reflectancia TOA de Landsat-ETM+; esto se realizó para cada banda espectral sobre el terreno que se muestra en la máscara de la normalización y la media del sesgo fue usada para ajustar los valores de reflectancia de las imágenes Landsat-ETM+. Para excluir las nubes, sombras de nubes y las áreas que representan un rápido cambio de cobertura de suelo. Únicamente, los píxeles con diferencia de reflectancia MODIS/Landsat-ETM+ debajo de 0,05 se incluyeron en la máscara de normalización.

Sin embargo, el sesgo no es constante en la escena Landsat, debido a los efectos de la anisotropía de superficie combinada con las variaciones en la visión y geometría solar. El sesgo de reflectancia fue modelado usando un ángulo de exploración como variable independiente:

$$\rho_{\text{normalizada}} = \rho_{\text{TOA}} - (A * \text{scan} + B)$$

En este caso ρ es reflectancia; A y B son los coeficientes derivados del modelo, y *scan* se refiere al ángulo de exploración en grados más el sesgo de la reflectancia Landsat-MODIS.

La normalización radiométrica se realizó independientemente para cada banda espectral e imagen Landsat-ETM+. Esta corrección se realizó para cada banda y para cada escena.

3.5. Proceso de clasificación

Para facilitar el procesamiento de las métricas, los datos de reflectancia normalizada fueron reducidos a 8 bits utilizando un factor de escala (g), que fue asignado para cada banda buscando mantener su rango dinámico (tabla 2).

$$ND = \rho * g + I$$

TABLA 2
Factores de escala (g)

Banda Landsat	g
Band 3 (Red)	508
Band 4 (NIR)	254
Band 5 (SWIR)	363
Band 7 (SWIR)	423

Fuente: Potapov *et al.*, 2013.

Además de las bandas de reflectancia, dos índices fueron calculados y añadidos al conjunto de métricas:

$$B3/B4 \text{ ratio (NDVI)} = ((B4-B3) / (B4+B3)) * 100 + 100$$

$$B4/B5 \text{ ratio (NBR)} = ((B4-B5) / (B4+B5)) * 100 + 100$$

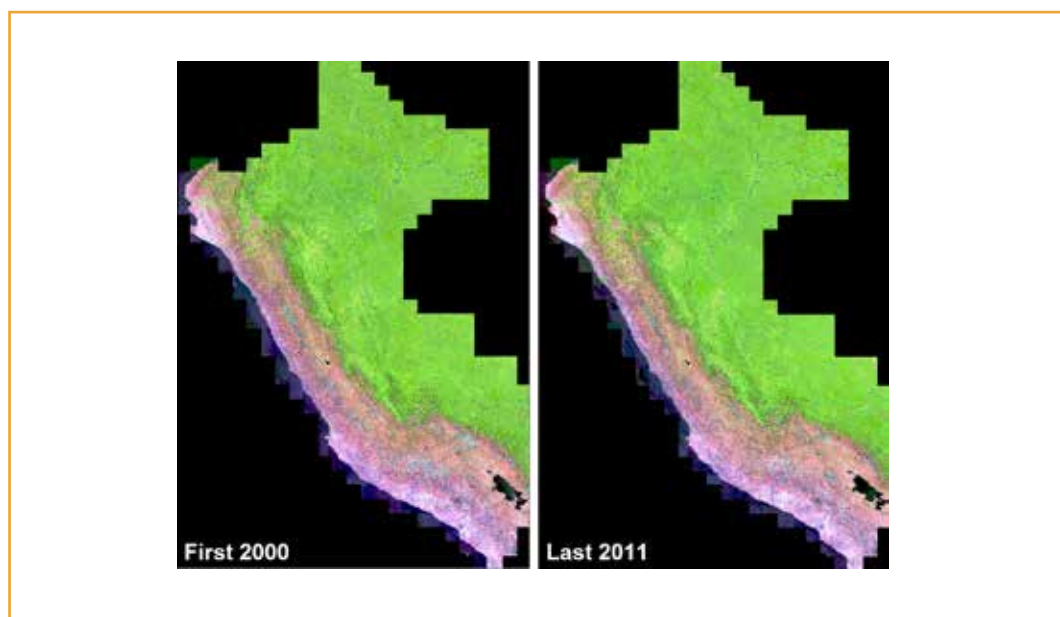
3.6. Creación de métricas

El análisis de la serie temporal de imágenes Landsat-ETM+ utiliza las métricas multitemporales (DeFries *et al.*, 1995; Hansen *et al.*, 2008; Potapov *et al.*, 2011) las cuales permitieron la detección del cambio de forma precisa durante 11 años de observaciones. El conjunto de datos utilizados para las métricas pasaron por un control de calidad (ver ítem 3.3) y fueron almacenados en cuadrantes de 2000 píxeles por lado, obteniéndose 458 cuadrantes para la superficie total del país que contienen todas las métricas utilizadas para la clasificación. Las métricas multitemporales creadas fueron las siguientes:

3.6.1. Métricas anuales del año 2000 al 2011

Corresponden a una serie de métricas construidas para obtener las mejores observaciones libres de nubes, desde principios del año 2000 hasta finales del 2011. Las métricas *First* (año 2000) y *Last* (Año 2011) muestran un compuesto de las primeras observaciones libres de nubes para el comienzo del año 2000 (*First*) y la última observación libre de nubes para el año 2011 (*Last*). Ver figura 4.

FIGURA 4
Composición de métricas anuales



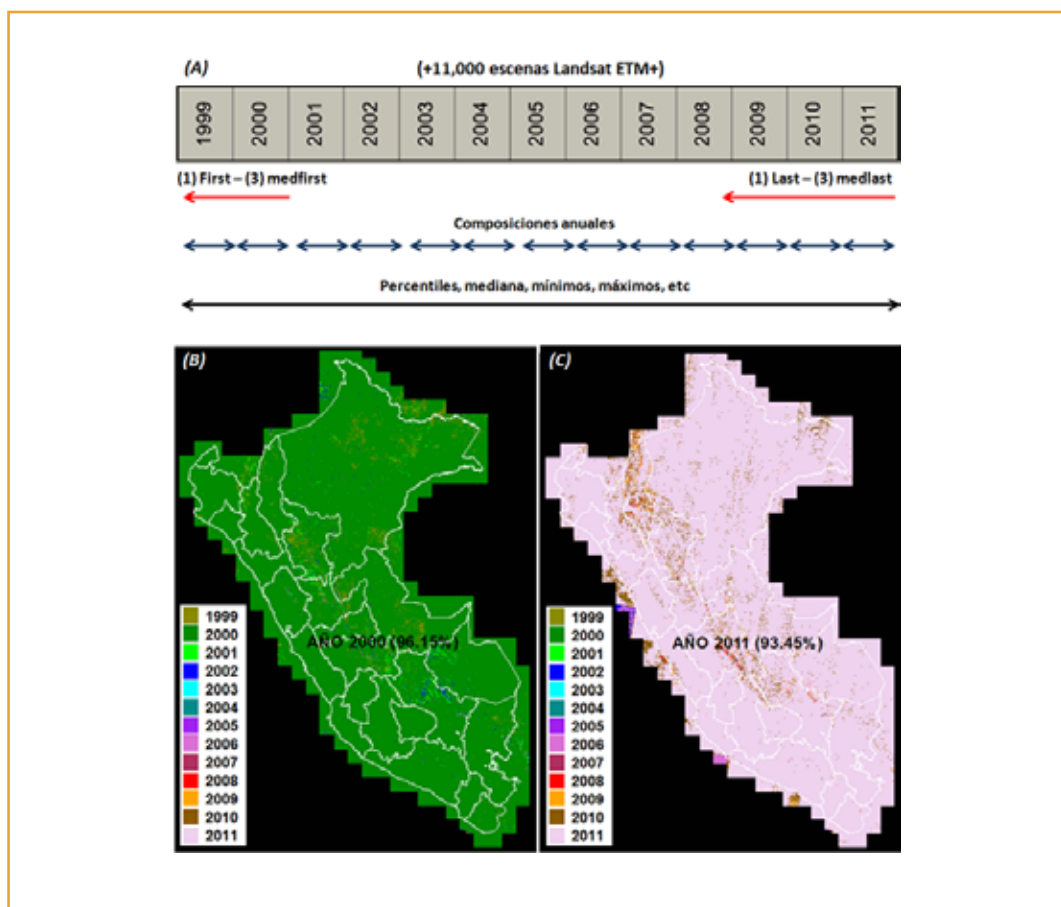
Izquierda: métrica *First* (Año 2000). **Derecha:** métrica *Last* (Año 2011). Fuente: Proyecto REDD+ MINAM

También se seleccionaron tres observaciones libres de nubes para los años 2000 (Med-First) y 2011 (MedLast). A partir de estas tres observaciones se generó la media y mediana para las bandas 3, 4, 5, 7, NDVI y NBR, datos que demostraron ser menos sensibles al ruido y fueron utilizados para el análisis visual y la evaluación del producto. En la composición de métricas siempre se prioriza el uso de píxeles del año en estudio y, en caso de que no existan píxeles idóneos, se utilizan los de años vecinos.

Adicionalmente, se crearon composiciones de píxeles (comp_2000 y comp_2011) cercanas a los años 2000 y 2011, construidas a partir cinco observaciones libres de nubes,

correspondientes a fechas cercanas al 15 de julio para cada año. Estas composiciones son únicamente para presentaciones visuales y pueden ser generadas para cualquier año. La composición del 2011 también utilizó píxeles del año 2012, aunque esta información no fue incluida en el conjunto de datos para la clasificación y solo fue utilizada para el análisis visual. Ver figura 5.

Figura 5
Distribución de píxeles por año



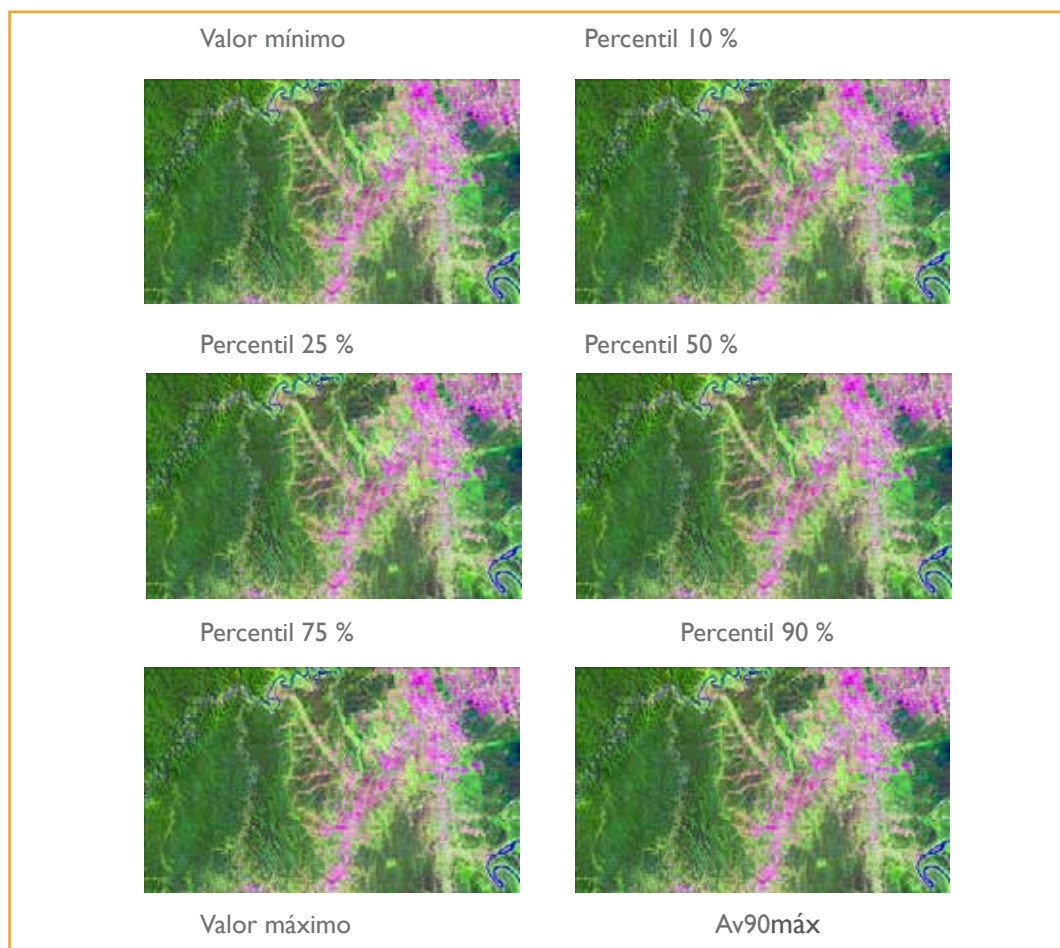
Superior A: la imagen muestra cómo se seleccionan los píxeles para los distintos compuestos de métricas anuales, aunque la métrica también utiliza píxeles de varios años ya que no existen observaciones libres de nubes para los años 2000 y 2011. **Inferior B:** compuesto de píxeles utilizados para la construcción de la métrica First (año 2000). **Inferior C:** compuesto de píxeles utilizados para la construcción de la métrica Last (año 2011). Fuente: Proyecto REDD+ MINAM.

3.6.2. Métricas basadas en rangos

Para producir métricas basadas en rangos, se utilizaron los datos de reflectancia de las bandas tomadas entre el año 2000 y el año 2011. Las métricas producidas representan el mínimo, el máximo y los percentiles 10 %, 25 %, 50 %, 75 % y 90 % de las bandas 3, 4, 5, 7, NDVI, NBR (ver figura 6) y los valores medios de reflectancia para los percentiles seleccionados (máx-10 %, 10-25 %, 25-50 %, 75-90 %, 90 %-máx, min-máx, 10-90 %, y los intervalos de 25-75 %). Ver figura 7.

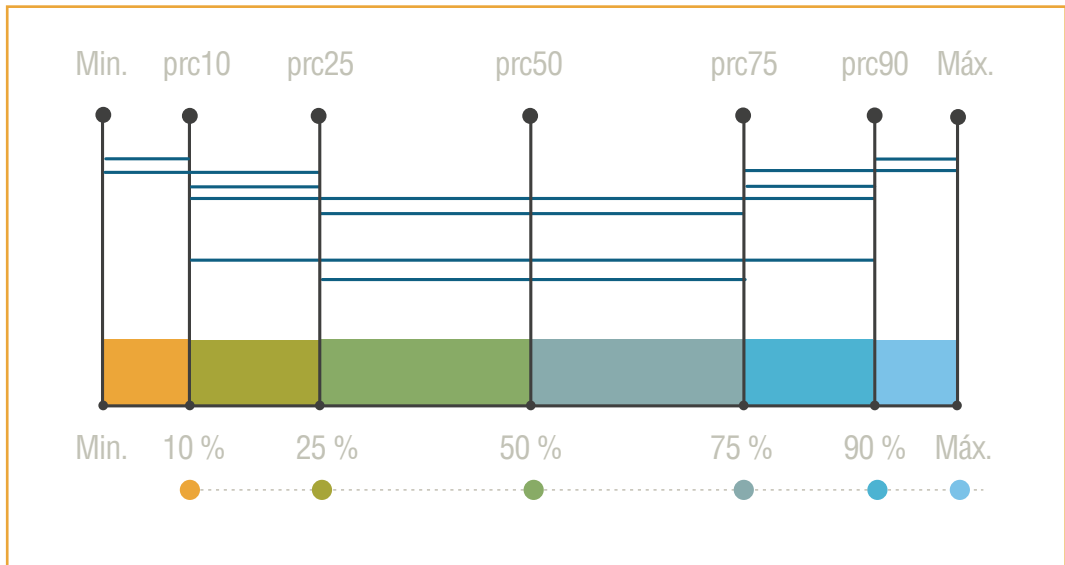
FIGURA 6

Métricas que representan el mínimo, el máximo y los percentiles 10 %, 25 %, 50 %, 75 % y 90 % generados a partir de los datos Landsat-ETM+



Fuente: Proyecto REDD+ MINAM.

FIGURA 7
Métricas basadas en rangos utilizadas principalmente en la detección de pérdida de cobertura de bosques



Fuente: modificado de Potapov *et al.*, 2013.

3.6.3. Métricas de análisis de tendencias

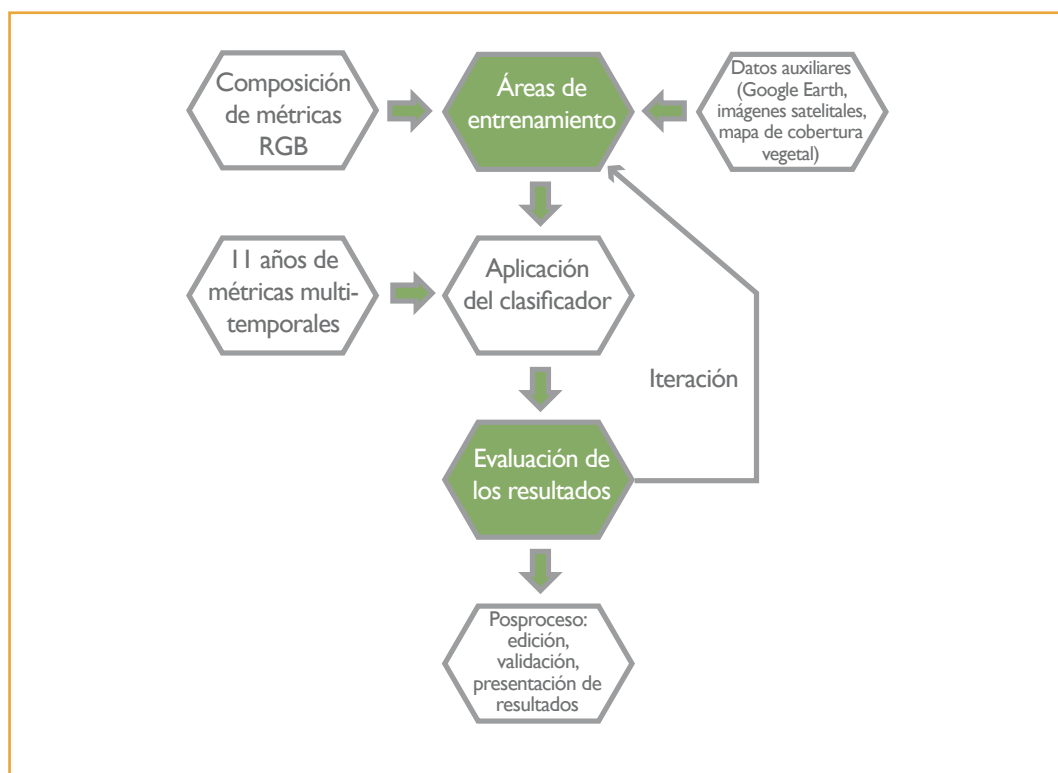
Las métricas que representan un cambio de señal del año 2000 al 2011 se obtuvieron a partir de la observación del conjunto de datos y por separado, a partir de los valores medios anuales de la banda de reflectancia. Este grupo de métricas incluye:

- Pendiente de la regresión lineal de los valores de reflectancia de la banda versus fecha de la imagen, así como la desviación estándar de los valores de reflectancia de la banda del año 2000 al 2011.
- Cambio máximo y mínimo de reflectancia entre las observaciones consiguientes, usando solamente una comparación de la media de dos observaciones y la mediana de tres observaciones.
- Señal de reflectancia y cambio correspondiente a los segmentos de la señal de ganancia y caída, incluyendo valores mínimos, máximos y delta.

3.7. Proceso de clasificación

El algoritmo de clasificación supervisada fue elaborado por la Universidad de Maryland y es un método basado en un “árbol de decisiones”. Este se generó a partir de muestras creadas manualmente, mediante la interpretación visual de las composiciones de métricas en RGB color; la información auxiliar proveniente del Google Earth, de otras imágenes de sensores satelitales disponibles (IKONOS, SPOT, RapidEye, Landsat 5) y, finalmente, del Mapa de Cobertura Vegetal (MINAM, 2009). Este algoritmo utiliza como data de entrada para la clasificación el conjunto de métricas generadas para todo el periodo de estudio. Si bien la clasificación de los datos se hace para todo el territorio peruano, las áreas de entrenamiento se realizaron en el ámbito de los bosques húmedos amazónicos y se obtuvieron resultados favorables con varias iteraciones. El flujo de trabajo para la clasificación se muestra en la figura 8.

FIGURA 8
Flujo de trabajo para el proceso de clasificación de Bosque/No bosque y pérdida de cobertura boscosa



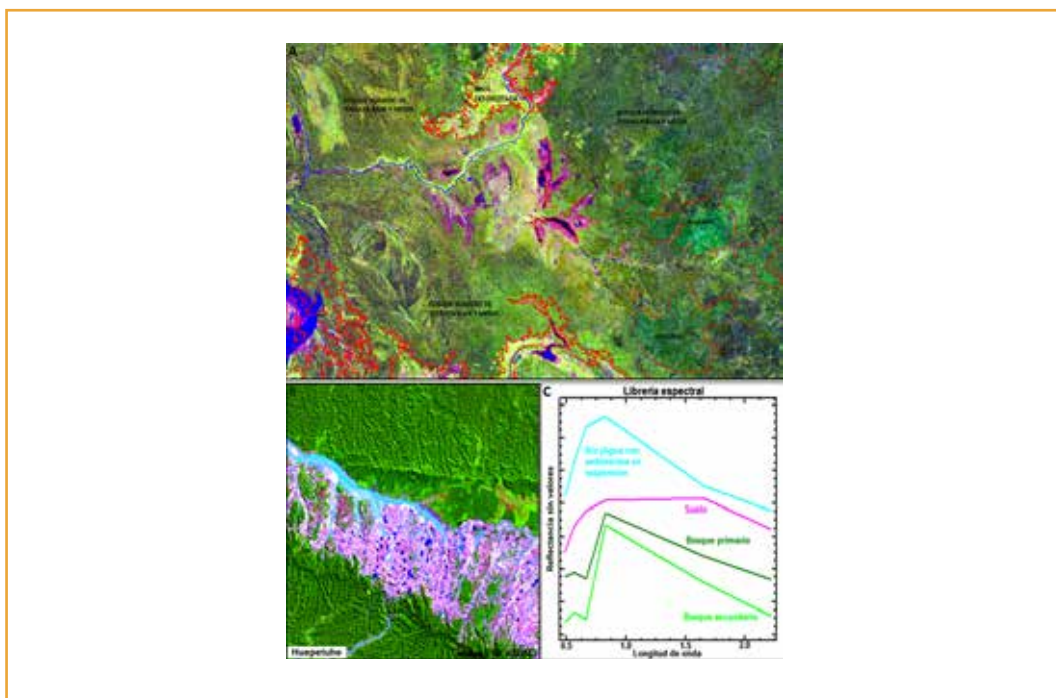
Fuente: modificado de Potapov *et al.*, 2013.

3.7.1. Clasificación de Bosque/No bosque

El mapeo de cobertura de bosque para el año 2000 se realizó a partir de la creación de áreas de entrenamiento realizadas manualmente y basadas en una interpretación visual (brillo-color-textura). La combinación RGB543 de la métrica *First* fue utilizada como base para la creación de las muestras. Esta combinación se caracteriza por mostrar, en la mayoría de los casos en tono verde oscuro, la cobertura forestal en estado maduro, mientras que en tonos verdes brillantes la vegetación en crecimiento. Esta diferencia de tonos se debe a la reflectividad que tiene la clorofila en la banda 4 de la imagen Landsat-ETM+. En esta combinación, los suelos muestran tonos variados debido a su composición química, a su textura y contenido de humedad; por ello, en la mayoría de los casos, presentan tonos rosáceos, fucsias o rojizos. En el caso del agua presenta tonos oscuros cuando no contiene elementos en suspensión y en el caso de aguas turbias se muestran en tonos celestes y azulados. Ver figura 9.

FIGURA 9

Coberturas de vegetación visualizadas desde la combinación RGB543 y firmas espectrales



A: la imagen muestra las diferencias de brillo-color-textura entre los distintos tipos de bosque. **B:** se observa las distintas firmas espectrales entre la deforestación y el bosque en la zona de Huepetuhe, Madre de Dios. **C:** la librería de las firmas espectrales muestra distintas características de absorción y reflectividad que posee el bosque primario, el bosque secundario, el suelo y los ríos. En los casos específicos de bosque primario y bosque secundario, se caracterizan por tener alta reflectividad en la banda 4, además los bosques secundarios tienen mayor reflectividad que los bosques primarios, diferencia que es usada para su respectiva discriminación. Fuente: Proyecto REDD+ MINAM.

El clasificador permite crear dos tipos de muestras de entrenamiento (Bosque/No bosque): las de Bosque, que fueron tomadas en áreas con presencia de bosque primario (bosque ribereño, bosque de terrazas, bosque de colinas y lomadas, bosque de pacales, aguajales, bosque de varillales, palmerales); mientras que las áreas de entrenamiento de No bosque fueron tomadas en áreas con presencia de bosque secundario, herbazales, sabana hidrofítica, áreas de cultivo, presencia de suelo, área urbana, infraestructura. Ver figura 10.

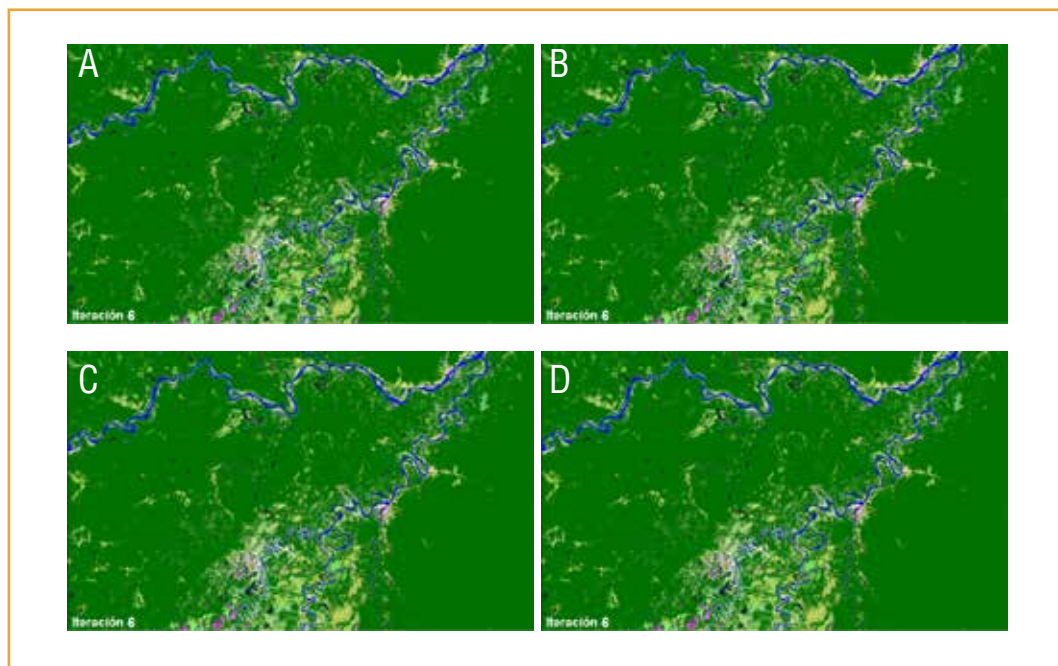
FIGURA 10
Muestras de entrenamiento (Bosque/No bosque)



Izquierda: la imagen muestra la combinación RGB543. **Derecha:** muestras de entrenamiento de Bosque y No bosque tomadas manualmente sobre la combinación RGB543. Fuente: Proyecto REDD+MINAM

Finalmente, se realizó la clasificación digital utilizando el algoritmo diseñado por la Universidad de Maryland, basado en un “árbol de decisiones”, con el que se obtuvieron mejores resultados a partir de la décima iteración (tomando en cuenta que se realizaron 15 iteraciones). Ver figura 11.

FIGURA 11
Iteraciones realizadas para la obtención de la capa de bosque en un sector del departamento de Loreto



Superior A: composición de píxeles para el año 2000. **B:** resultado de la capa de bosque de la cuarta iteración. **Inferior C:** resultado de la capa de bosque de la sexta iteración. **D:** resultado de la capa bosque de la décima iteración en la cual ya se observan resultados aceptables. Fuente: Proyecto REDD+MINAM

3.7.2. Clasificación de pérdida de cobertura boscosa entre los años 2000 y 2011

La clasificación de pérdida de cobertura de bosques utilizó dos tipos de muestras de entrenamiento (Pérdida y No pérdida). Las muestras de Pérdida se enfocaron en las áreas que muestran pérdida de cobertura de bosque (bosque primario) siguiendo los criterios que se detallan a continuación:

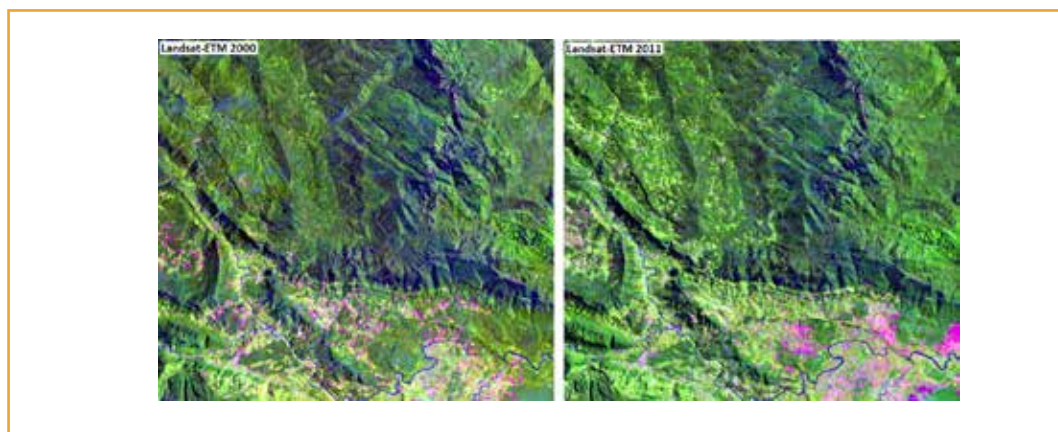
TABLA 3
Criterios para la clasificación de pérdida de cobertura boscosa

Data 2000	Data 2011	Clasificación
Bosque	Bosque secundario/suelo/áreas de cultivo/otros	Pérdida
Bosque	Lecho de río	Pérdida

Fuente: proyecto REDD+ MINAM.

Las muestras de entrenamiento se crearon de forma manual por un intérprete. Las métricas utilizadas para la creación de las muestras fueron: *First*, *Last* y la métrica *Av90max* que refleja la mayor presencia de suelo en todo el periodo de estudio. Ver figura 12.

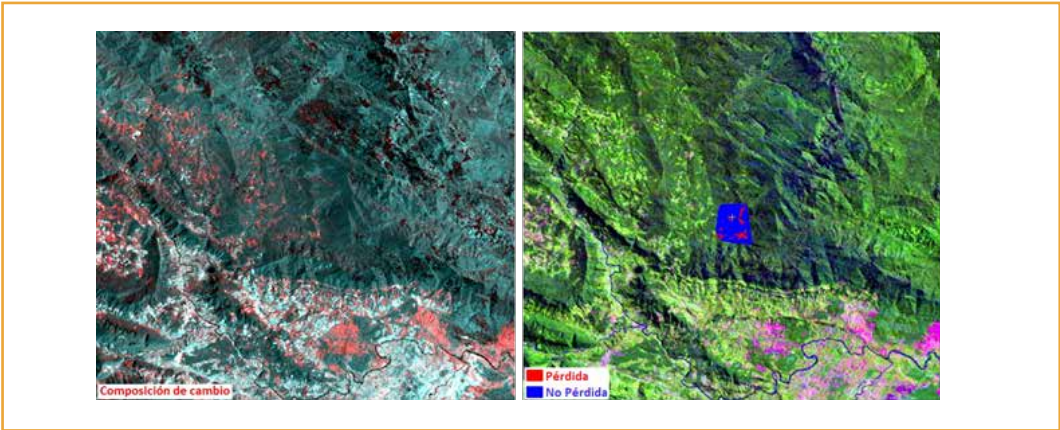
FIGURA 12
Imágenes base utilizadas para la creación de muestras de entrenamiento del año 2000 al 2011



Izquierda: imagen Landsat ETM del año 2000. **Derecha:** imagen Landsat ETM del año 2011 en la que se observa la pérdida de cobertura de bosque desde el año 2000. Fuente: Proyecto REDD+ MINAM.

La composición de cambio se realizó integrando la banda 5 de la métrica *Av90max* y la banda 5 del año 2000, obteniéndose una imagen que muestra en tonos rojizos algún tipo de cambio entre las coberturas de ambos años. Esta imagen fue utilizada como referencia para la creación de las muestras de entrenamiento, que se distribuyeron en todo el ámbito de estudio. Ver figura 13.

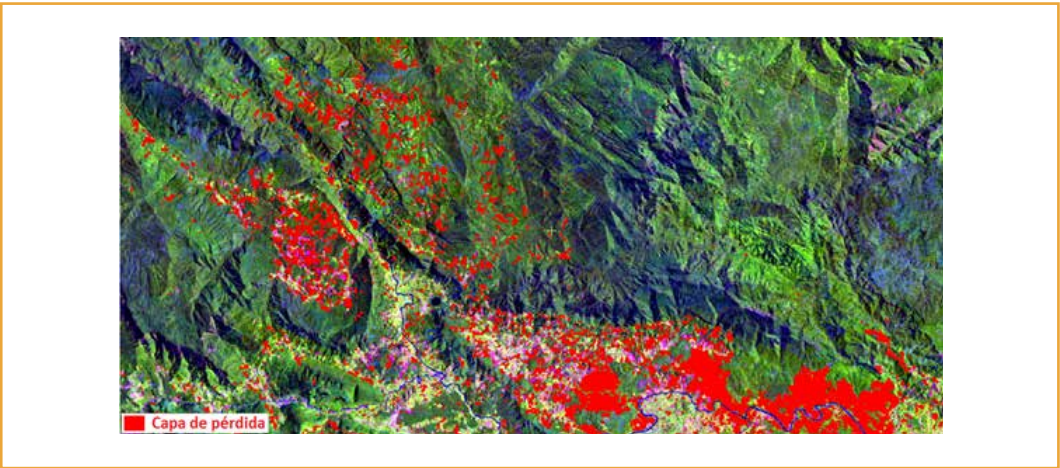
FIGURA 13
Composición de cambio y creación de áreas de entrenamiento para la clasificación de Pérdida y No pérdida de cobertura de bosques



Izquierda: la composición de cambio resalta las áreas de cambio de cobertura de bosques en tonos rojizos. **Derecha:** creación de muestras de entrenamiento en base a la composición de cambio y la respectiva verificación de la pérdida de bosques. Fuente: Proyecto REDD+ MINAM.

El proceso de clasificación es similar al utilizado en el mapeo de Bosque/No bosque, realizándose 15 iteraciones. Ver figura 14.

FIGURA 14
Resultados de pérdida de cobertura boscosa

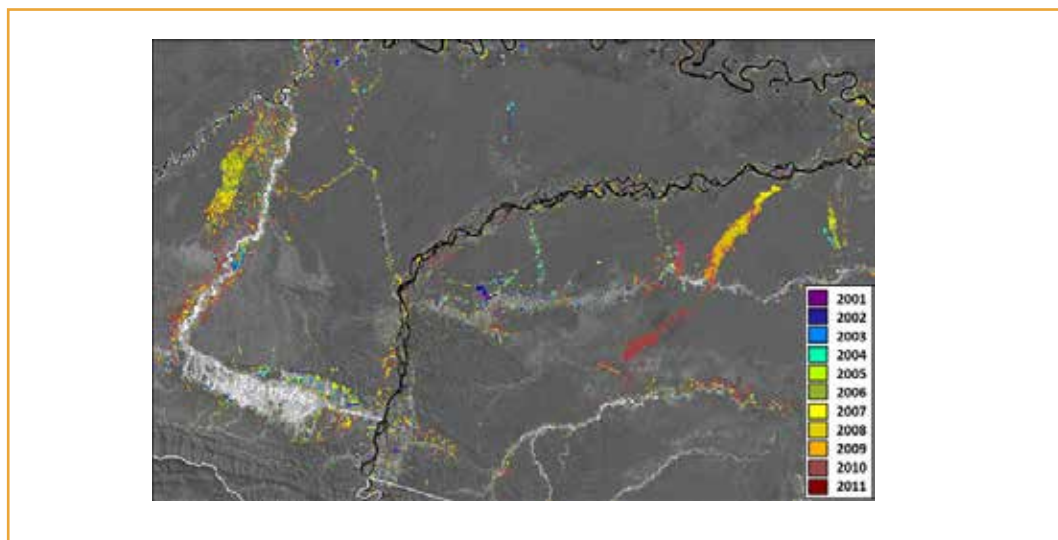


Fuente: Proyecto REDD+ MINAM.

Una vez obtenida la capa de pérdida de cobertura de bosques, entre los años 2000 y 2011, se corrió un algoritmo que identifica en qué año sucedió la pérdida de cobertura de bosques, obteniéndose un ráster de pérdida de cobertura de bosques para cada año. Ver figura 15.

FIGURA 15

Capa de pérdida anual para las áreas afectadas por minería informal en el departamento de Madre de Dios



Fuente: Proyecto REDD+ MINAM.

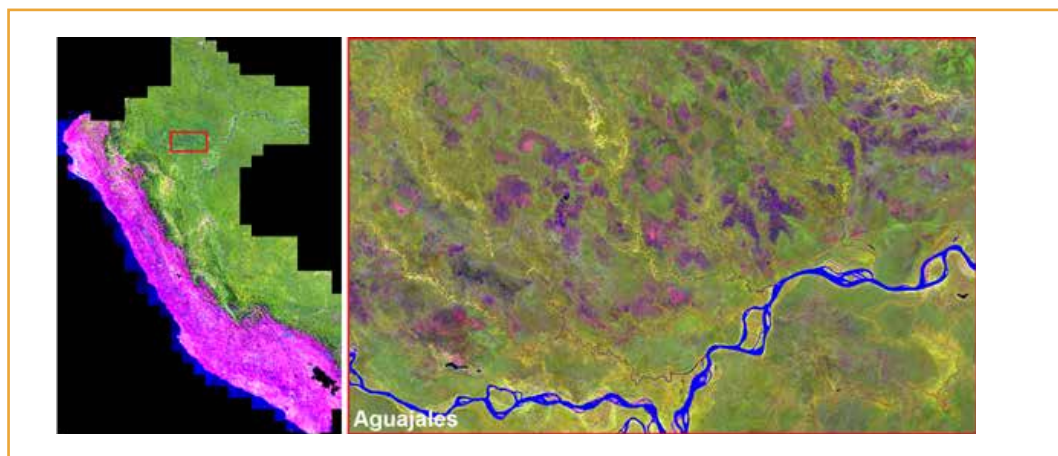
3.8. Posproceso

La información preliminar generada a partir de la clasificación semiautomática fue presentada a un panel de expertos realizado el día 8 de abril del año 2013 en el auditorio del MINAM. La reunión contó con la presencia de representantes de diversas instituciones (MINAN, MINAGRI, OTCA, SERNANP, UNALM). El grupo de expertos evaluó visualmente la capa de bosque del año 2000 e identificó los distintos tipos de cobertura vegetal existentes en la Amazonía además de algunos problemas de omisión/comisión en áreas principalmente cubiertas por aguajales, pacales y herbazales.

3.8.1. Aguajales

Algunos aguajales presentan áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva, lo que sumado a la dinámica propia del ecosistema, dificulta su interpretación visual. Estos aguajales fueron observados en su mayoría en el departamento de Loreto. Ver figura 16.

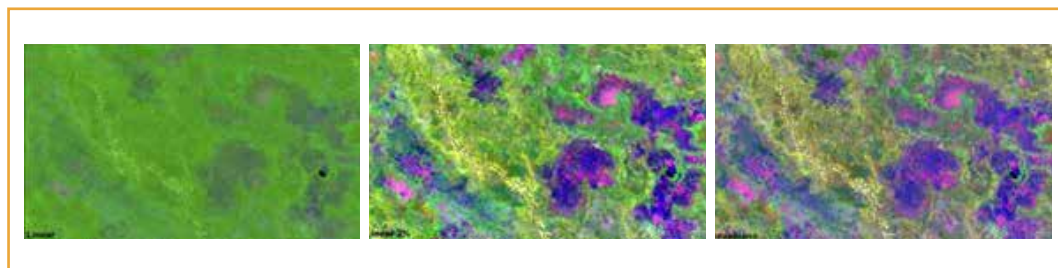
FIGURA 16
Aguajales vistos desde la composición de métricas del año 2000 (comp_2000)



Fuente: Proyecto REDD+ MINAM.

Los aguajales presentan variaciones de tonos de color dependiendo del realce utilizado lo que complica aún más la interpretación. Dependiendo del realce que se aplique, los aguajales pueden mostrar tonos fucsias que podrían interpretarse como alta presencia de suelo desnudo cerca a estas áreas. Ver figura 17.

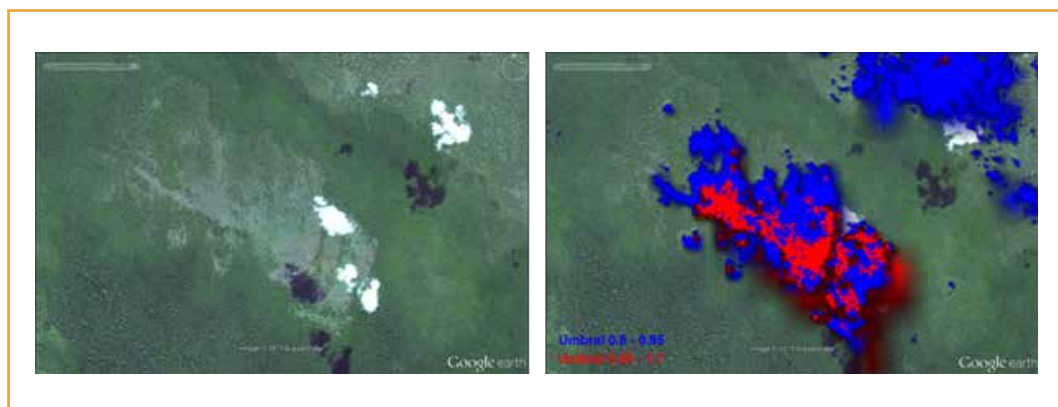
FIGURA 17
Aguajales vistos con distintos tipos de realce



Fuente: Proyecto REDD+ MINAM.

Para afinar la capa de aguajales, obtenida utilizando el método de “árbol de decisiones” desarrollado por la Universidad de Maryland, se decidió identificar las áreas de suelo permanente. Para lograrlo, se sumaron las bandas 4 y 5 de las composiciones del año 2000 (comp_2000) y del 2011 (comp_2011). Al total se le pasó un filtro de textura de media 3×3 y se aplicó el ratio banda 5/banda 4. El resultado fue una imagen en escala de grises donde los valores más altos corresponden a la mayor probabilidad de presencia de suelo. Para determinar el umbral de la capa de suelo permanente se utilizaron imágenes de alta resolución disponibles en Google Earth. Se determinaron dos umbrales: 0,8 y 0,95; el primero mapea las áreas de suelo y la mezcla espectral del suelo con vegetación; el segundo mapea las áreas con suelo desnudo. Ver figura 18.

FIGURA 18
Umbral evaluado para la obtención de suelo permanente



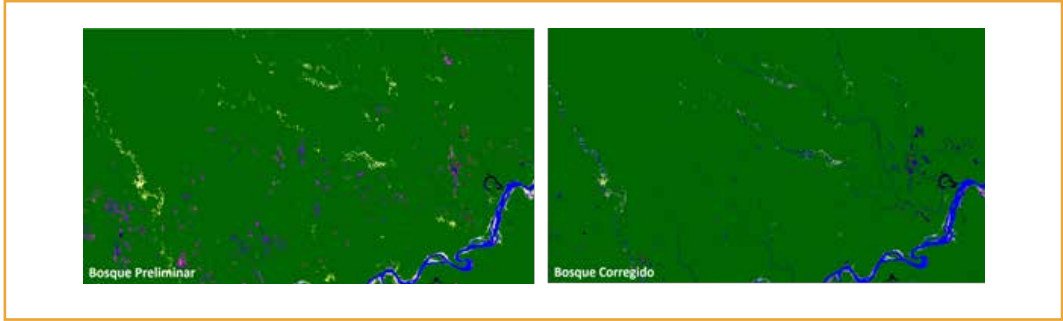
Izquierda: imagen de alta resolución disponible en el Google Earth. **Derecha:** umbrales evaluados para la obtención de suelo permanente, se observa en color azul el mapeo para el umbral 0,8 y en color rojo el mapeo para el umbral 0,95. Fuente: Proyecto REDD+ MINAM.

Se optó por usar el umbral 0,95 para generar la capa de suelo permanente debido a la falta de información multitemporal satelital de alta resolución para la zona en estudio. Al resultado se le aplicó un filtro¹ de media de 5×5 píxeles para así evitar errores de comisión en los datos. Finalmente, solo se extrajo la información de suelo permanente en áreas de aguajales utilizando como máscara la capa de los mismos del Mapa de Cobertura Vegetal (MINAM, 2009). El resultado final fue extraído de la capa de Bosque/No bosque generado con la metodología desarrollada por la Universidad de Maryland obteniéndose el producto que se muestra en la figura 19.

¹ Se definen como matrices de coeficientes numéricos que permiten atenuar o acentuar (según su finalidad y estructura) las gradaciones radiométricas presentes en una imagen. Chuvieco, E. (2002)

FIGURA 19

Capa de bosque en áreas de aguajales localizados al oeste del departamento de Loreto



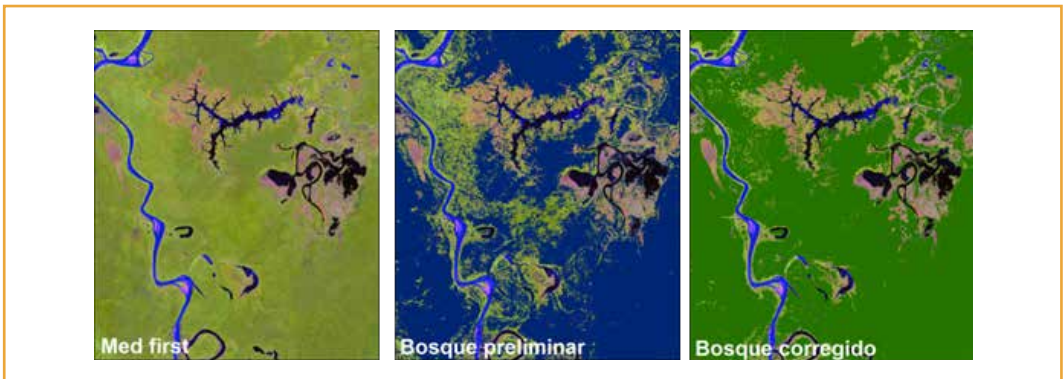
Izquierda: capa de bosque sin editar en área de aguajales. **Derecha:** capa editada en zona de aguajales con sustracción de suelo permanente. Fuente: Proyecto REDD+ MINAM.

3.8.2. En herbazales

En el caso de los herbazales y las áreas circundantes, se encontraron errores de omisión/comisión, principalmente en áreas de bosque que muestran coloraciones verde brillante. Para solucionar este problema y delimitar mejor las áreas con presencia de herbazales, se aplicó un filtro de textura de media de 3×3 a la métrica MedFirst (año 2000). A esta información se aplicó el *ratio* banda5/banda4, se generó el umbral y se le aplicó máscara para extraer la información correspondiente a herbazales y áreas circundantes. Ver figura 20.

FIGURA 20

Capa final de bosque en áreas con presencia de herbazal en el departamento de Ucayali



Izquierda: métrica MedFirst utilizada para la delimitación de herbazales. **Centro:** capa de bosque preliminar obtenido con la metodología propuesta por la universidad de Maryland. **Derecha:** capa final de bosque en herbazales. Fuente: Proyecto REDD+ MINAM.

3.8.3. Pacales

Los pacales presentaron problemas de omisión probablemente debido al variado comportamiento espectral que posee este tipo de cobertura. Las áreas que no fueron incluidas como Bosque por el clasificador fueron las que presentaron alta reflectancia en la banda 4. En la combinación RGB543 estas áreas se muestran en tonos amarillentos y verdes brillantes. Ver figura 21.

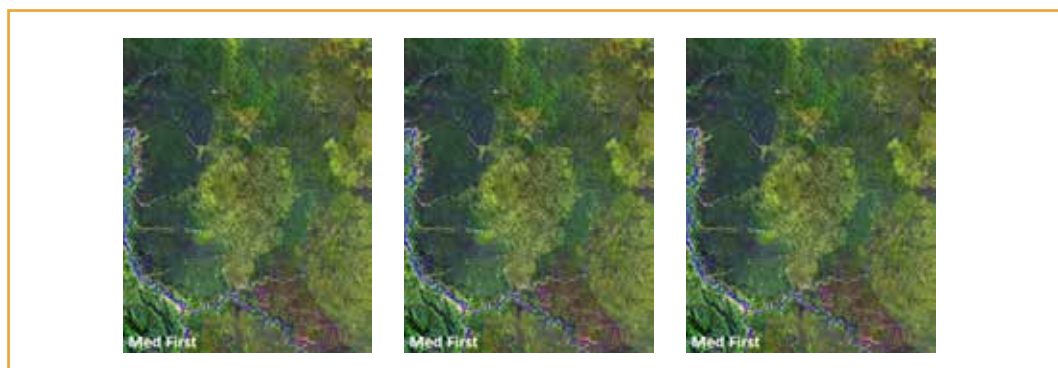
FIGURA 21
Métrica MedFirst (año 2000) muestra el bosque de pacal localizado entre los departamentos de Cusco y Madre de Dios



Fuente: Proyecto REDD+ MINAM.

Debido a la complejidad y variabilidad espectral, se decidió hacer una corrección manual pues la de tipo digital causaría mucha confusión ya que es muy común confundir el bosque de pacal con bosque secundario o con áreas de cultivo. Los criterios utilizados para la interpretación visual fueron: análisis del tono, textura, la espacialidad y la temporalidad. Finalmente, se corrigieron los errores de omisión existentes en la capa preliminar. Ver figura 22.

FIGURA 22
Vista de la corrección manual realizada en los bosques de pacaes

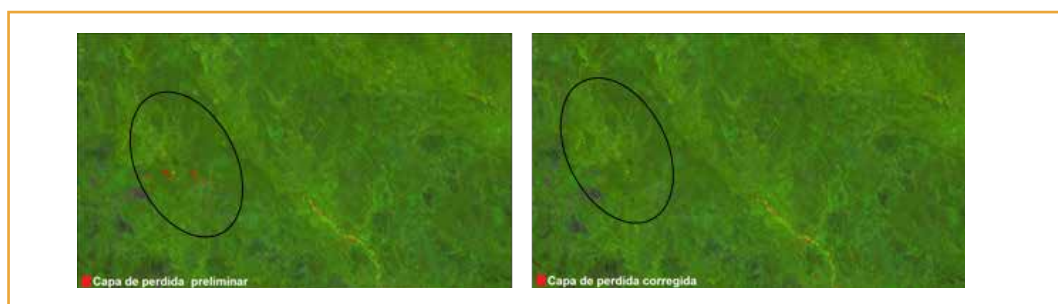


Izquierda: métrica MedFirst (año 2000). **Centro:** capa preliminar de bosques de pacaes obtenida con el clasificador donde se pueden observar los errores de omisión producidos por la variada respuesta espectral de los pacaes. **Derecha:** capa de bosque de pacaal después de la edición manual. Fuente: Proyecto REDD+ MINAM.

3.8.4. Capa de pérdida de cobertura boscosa

La capa de pérdida de cobertura boscosa fue editada manualmente utilizando la interpretación de los resultados y las métricas *First*, *Last* y *Av90max*. Las áreas editadas corresponden a errores de comisión. En el caso de agujales, se evaluó si la pérdida fue producida por una actividad antrópica o si se consideró un cambio natural debido a la dinámica del agujal. De haber sido este último caso, se editó y eliminó de la capa de pérdida de cobertura boscosa. Ver figura 23.

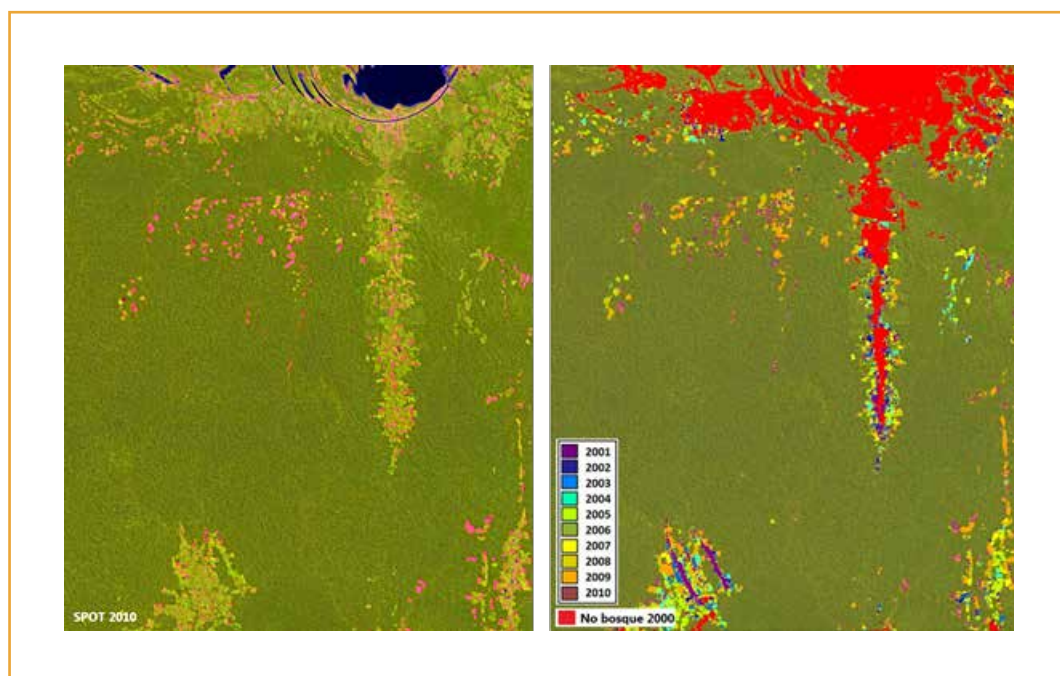
FIGURA 23
Capa de pérdida de bosques en el departamento de Loreto



Izquierda: la imagen muestra en color rojo la capa de pérdida de cobertura boscosa en agujales. **Derecha:** capa de pérdida de cobertura boscosa editada. Se observa que la capa de cambio en el agujal fue eliminada por considerarse un cambio natural y parte de la dinámica de este ecosistema. Fuente: Proyecto REDD+ MINAM.

Posteriormente, se realizó una evaluación de la pérdida para cada año haciendo comparaciones visuales entre los resultados y la información satelital disponible en la base de datos (IKONOS, SPOT, RapidEye, Landsat). El análisis visual mostró una alta correlación entre los resultados y las imágenes satelitales disponibles. Ver figura 24.

FIGURA 24
Comparación visual entre el resultado de pérdida de cobertura boscosa y la información satelital disponible



Izquierda: imagen SPOT del año 2010. **Derecha:** capa de cobertura de pérdida boscosa sobre imagen SPOT del año 2010, se puede observar la buena correlación entre los dos datos. Fuente: Proyecto REDD+ MINAM.

3.9. Evaluación de la precisión

La evaluación de la precisión permite al usuario valorar el grado de semejanza entre los mapas obtenidos con la realidad. Para evaluar la precisión de los datos, se realizó una validación estadística de todo el mapa de pérdida de cobertura de bosques. Para el muestreo se usó un método estratificado aleatorio que dividió área de estudio en dos estratos: las áreas con mayor probabilidad de cambio y aquellas con menor probabilidad de cambio. A partir de estos estratos, se generaron aleatoriamente 30 bloques de 12 x 12 km y, en cada cuadrícula, se identificaron 100 polígonos, que suman la unidad mínima de mapeo (píxel: 30 m), distribuidos al azar. Para mantener la imparcialidad en el proceso de validación se contrataron dos consultores ajenos al proceso de clasificación y de edición de los datos. Ellos hicieron la interpretación visual de los 3000 puntos identificados para la validación en base a imágenes Landsat del año 2000 e imágenes RapidEye del año 2011. Los resultados de exactitud se calcularon sobre la base de la pérdida de bosque y No cambio para una muestra total de 2553 puntos. Obteniéndose una exactitud global de 97,33 %. En el siguiente cuadro se muestran los resultados de la matriz de confusión y el cálculo de la exactitud global:

TABLA 4
Matriz de confusión

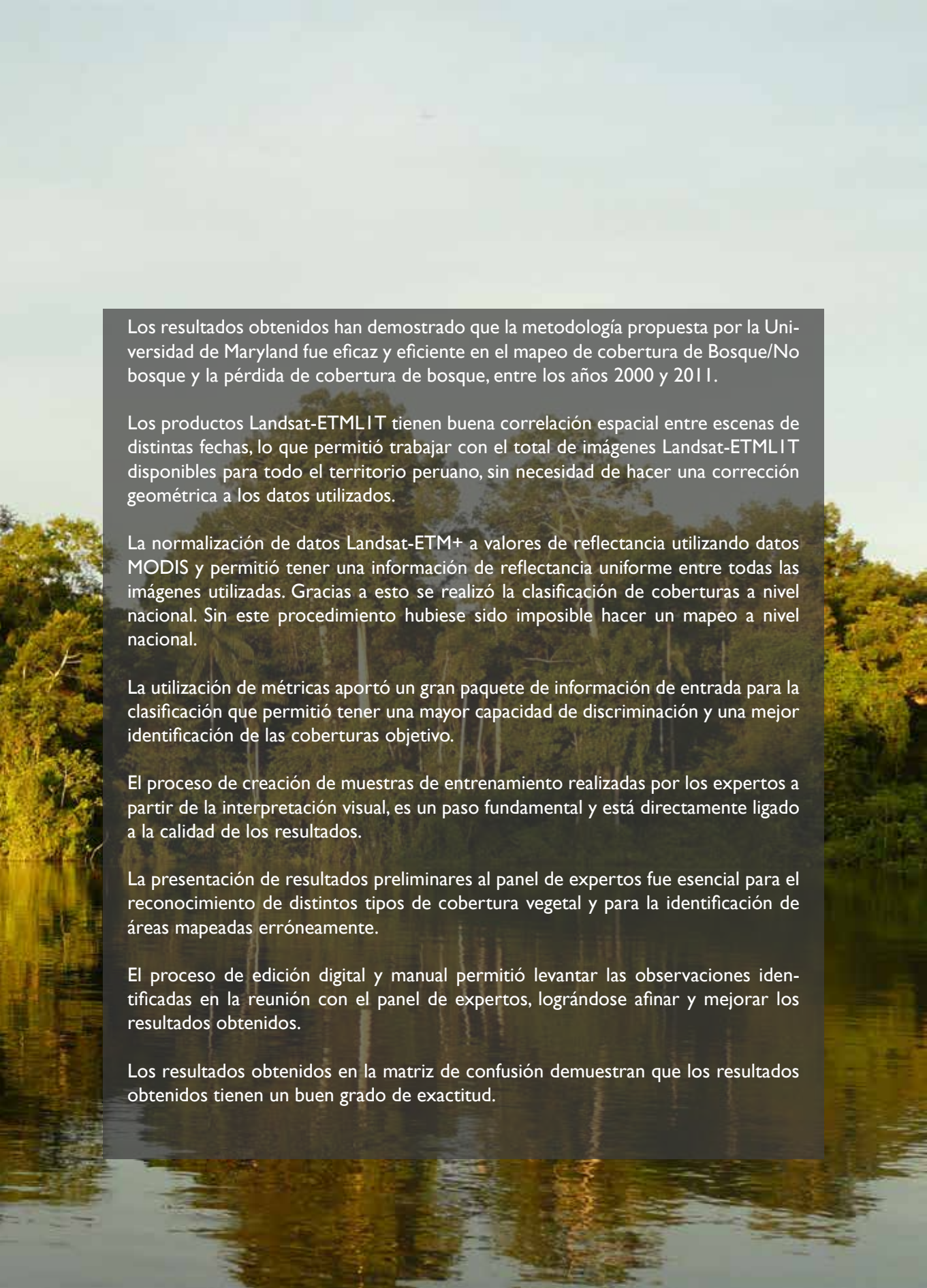
	No cambio	Pérdida de bosque	Total	Exactitud Usuario (%)	Error comisión (%)
Bosque	99,30	32,93	95,26	97,89	2,11
Pérdida de bosque	0,70	67,07	4,74	86,15	13,85
Total	100,00	100,00	100,00		
Exactitud productor	99,30	67,07		Exactitud global (%) 97,33	
Error omisión (%)	0,7	32,93			

Fuente: Proyecto REDD+ MINAM.

Los resultados obtenidos presentan una elevada exactitud global y muy buenos resultados en la exactitud del productor y de usuario.

CONCLUSIONES





Los resultados obtenidos han demostrado que la metodología propuesta por la Universidad de Maryland fue eficaz y eficiente en el mapeo de cobertura de Bosque/No bosque y la pérdida de cobertura de bosque, entre los años 2000 y 2011.

Los productos Landsat-ETMLIT tienen buena correlación espacial entre escenas de distintas fechas, lo que permitió trabajar con el total de imágenes Landsat-ETMLIT disponibles para todo el territorio peruano, sin necesidad de hacer una corrección geométrica a los datos utilizados.

La normalización de datos Landsat-ETM+ a valores de reflectancia utilizando datos MODIS y permitió tener una información de reflectancia uniforme entre todas las imágenes utilizadas. Gracias a esto se realizó la clasificación de coberturas a nivel nacional. Sin este procedimiento hubiese sido imposible hacer un mapeo a nivel nacional.

La utilización de métricas aportó un gran paquete de información de entrada para la clasificación que permitió tener una mayor capacidad de discriminación y una mejor identificación de las coberturas objetivo.

El proceso de creación de muestras de entrenamiento realizadas por los expertos a partir de la interpretación visual, es un paso fundamental y está directamente ligado a la calidad de los resultados.

La presentación de resultados preliminares al panel de expertos fue esencial para el reconocimiento de distintos tipos de cobertura vegetal y para la identificación de áreas mapeadas erróneamente.

El proceso de edición digital y manual permitió levantar las observaciones identificadas en la reunión con el panel de expertos, lográndose afinar y mejorar los resultados obtenidos.

Los resultados obtenidos en la matriz de confusión demuestran que los resultados obtenidos tienen un buen grado de exactitud.



BIBLIOGRAFÍA

- BROICH, M., M. C. HANSEN, F. STOLLE, P.V. POTAPOV, B.A. MARGONO y B. ADUSEI
2011 Remotely sensed forest cover loss shows high spatial and temporal variation across Sumatera and Kalimantan, Indonesia 2000-2008. *Environmental Research Letters*, 6/1, doi:10.1088/1748-9326/6/1/014010.
- CARROLL, M., J. R. G. TOWNSHEND, M. C. HANSEN, C. DIMICELI, R. SOHLBERG, y K. WURSTER,
2010 *Vegetative cover conversion and vegetation continuous fields.*
In B. Ramachandran, C. Justice, & M. Abrams (Eds.), *Land remote sensing and global environmental change: NASA's EOS and the science of ASTER and MODIS.* New York: Springer.
- CHANDER, G., B. L. MARKHAM, y D. L. HELDER
2009 Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment* 113, 893-903.
- DEFRIES, R., M. HANSEN y J. TOWNSHEND
1995 "Global Discrimination of Land Cover Types from Metrics Derived from AVHRR Pathfinder Data." *Remote Sensing of Environment* 54, no. 3, 209-222.
- HANSEN, M. C., R. DEFRIES, J. R. G. TOWNSHEND, M. CARROLL, C. DIMICELI, y R. A. SOHLBERG
2003 Global Percent Tree Cover at a Spatial Resolution of 500 Meters: First Results of the MODIS Vegetation Continuous Fields Algorithm. *Earth Interactions* 7, n.º 10, 1-15.
- HANSEN, M. C., S. V. STEHMAN, P. V. POTAPOV, T. R. LOVELAND, J. R. G. TOWNSHEND, R. S. DEFRIES, K. W. PITTMAN, F. STOLLE, M. K. STEININGER, M. CARROLL y C. DIMICELI
2008 Humid Tropical Forest Clearing from 2000 to 2005 quantified using multi-temporal and multi-resolution remotely sensed data, *P. Natl. Acad. Sci. USA* 105, 9439-44 [doi:10.1073/pnas.0804042105].
- KILLEEN, T. J., V. CALDERON, L. SORIA, B. QUEZADA, M. K. STEININGER, G. HARPER, L. A. SOLORZANO, y C. J. TUCKER,
2007 Thirty years of land-cover change in Bolivia. *Ambio*, 36(7), 600-606.

PROTOCOLO DE CLASIFICACIÓN DE PÉRDIDA DE
COBERTURA EN LOS BOSQUES HÚMEDOS AMAZÓNICOS ENTRE LOS AÑOS 2000 y 2011

MINISTERIO DEL AMBIENTE

2012 *Memoria Descriptiva de Mapa de Cobertura Vegetal del Perú.*

NASA

2013 Study Finds Severe Climate Jeopardizing Amazon Forest-NASA/JPL-Caltech GSFC.
Recuperado de: <http://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?release=2013-025>

POTAPOV, P., S. TURUBANOVA y M. C. HANSEN

2011 “Regional-scale Boreal Forest Cover and Change Mapping Using Landsat Data Composites for European Russia.” *Remote Sensing of Environment* 115, n. ° 2 548-561.

POTAPOV, P., S. TURUBANOVA, M. C. HANSEN, B. ADUSEI, M. BROICH, A. ALTSTATT, L. MANE Y C. O. JUSTICE

2012 “Quantifying Forest Cover Loss in Democratic Republic of the Congo, 2000-2010, with Landsat ETM+ Data.” *Remote Sensing of Environment* 122, 106-116.

