

Análisis de Mezclas Espectrales para el estudio de la deforestación y establecimiento de la línea de referencia de emisiones en el marco del programa REDD. Aplicación a la región de San Martín, Perú.

Ángel Natal Tello y Rafael García Rodríguez

ETSI Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid. Av. Complutense s/n. 28040. Madrid. Email: anataltello@gmail.com

Resumen: La determinación de la línea histórica de deforestación como parte del establecimiento de la línea de referencia de emisiones, en el marco del programa REDD (*Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation*), permite medir la evolución de la pérdida de bosque en un periodo definido de tiempo. El objetivo fue calcular la línea histórica de deforestación mediante estudio multitemporal para el periodo 1998-2011, en la región de San Martín (Perú), utilizando la metodología de Análisis de Mezclas Espectrales (*Spectral Mixtures Analysis*) con imágenes Landsat 5-TM.

Palabras clave: teledetección, Landsat 5-TM, análisis de mezclas espectrales, REDD, Protocolo de Kioto, deforestación, Amazonía, SMA

Spectral Mixture Analysis for the study of deforestation and establishing reference emissions level within the REDD Program framework. Application to the region of San Martin, Peru.

Abstract: Determination of the historical baseline of deforestation as part of establishing the reference emissions level within the REDD (Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation) Program framework allows for the measurement of the evolution of forest loss over a defined period time. The objective was to estimate the historical baseline of deforestation through a multi-temporal study for the period 1998-2011, in the region of San Martin (Peru), using the methodology of Spectral Mixture Analysis (Mixtures Spectral Analysis) from Landsat 5-TM imagery.

Keywords: remote sensing, Landsat 5-TM, spectral mixtures analysis, REDD, Kyoto Protocol, deforestation, Amazon, SMA

1. INTRODUCCIÓN

Una línea de referencia de emisiones REDD (*Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation*) define una expectativa de las emisiones de CO₂e (gases de efecto invernadero medidos en unidades equivalentes de dióxido de carbono) de la deforestación en ausencia de esfuerzos adicionales para frenar este tipo de emisiones.

La determinación de los niveles de referencia de emisiones para medir la reducción de éstos procedentes de la deforestación se ha convertido así en el centro de las negociaciones sobre el mecanismo REDD en el marco de políticas post Kioto (Verchot & Petkova, 2010). El enfoque de REL (*Reference Emission Level*) es determinante para el éxito de un mecanismo de REDD porque afecta a la cantidad, la credibilidad, y equidad de los créditos generados por los esfuerzos para reducir las emisiones de carbono de los bosques (Griscom, et al. 2009).

La metodología de Análisis de Mezclas Espectrales (SMA, *Spectral Mixtures Analysis*), que se ha utilizado en este trabajo para el cálculo de la deforestación (Moreira de Souza Junior y Nascimento Siqueira, 2013), asume que los espectros de una imagen están formados por una combinación lineal de n espectros puros (o *endmembers*), de tal manera que:

$$R_b = \sum_{i=1}^n F_i R_{i,b} + \varepsilon_b \quad (1)$$

para

$$\sum_{i=1}^n F_i = 1 \quad (2)$$

donde,

- R_b, es la reflectancia en la banda b,
- R_{i,b} es la reflectancia de endmember i, en banda b,
- F_i, es la fracción de i endmember y
- ε_b, es el error residual para cada banda.

La metodología SMA permite extraer, a partir de la reflectancia de una imagen, información de las propiedades físicas de la cobertura terrestre a nivel de píxel basándose en los espectros puros, definidos previamente por las longitudes de ondas detectadas y el número de bandas del sensor. La etapa más importante en la aplicación de la metodología SMA es el establecimiento de los espectros puros para las imágenes de satélite a utilizar. En el caso del presente estudio, se han utilizado imágenes Landsat 5/TM, y se han establecido tres *endmembers*: Vegetación Fotosintética (VF), Vegetación No Fotosintética (VNF) y Suelo desnudo (S). Previamente se llevaron a cabo, con la herramienta CLASlite versión 3.2, los tratamientos de corrección radiométrica y atmosférica para obtener el cálculo de la reflectancia de las imágenes a fin de generar los enmascaramientos de nubes, masas de agua y sombras asociadas a las nubes y a la orografía.

El análisis de la cobertura del bosque, utilizando la metodología SMA, se basó en dos componentes:

- Algoritmo de mezcla espectral AutoMCU (*Automated Monte Carlo Unmixing*), (Asner y Heidebrecht, 2002), que permite el análisis

probabilístico de mezcla espectral sobre las características del dosel forestal.

- Librerías de firmas espectrales: procedentes del sensor hiperespectral Hyperion (para VF) y de espectrómetros de campo con registros entre los 400-2.500 nanómetros (para VNF y S).

El presente artículo recoge parte de los trabajos llevados a cabo en el proyecto para la determinación de la línea de referencia de emisiones REDD (*Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation*) en la región de San Martín, en Perú. En concreto, se centra en el cálculo de la línea histórica de deforestación para el periodo 1998-2011 en dicha región, a partir de la metodología de clasificación por Análisis de Mezclas Espectrales.

2. ZONA DE ESTUDIO

La región de San Martín (latitud sur: 5° 15' 00" y 8° 25' 15" y longitud oeste: 75° 45' 00" y 77° 24'), con una superficie total de 5.125.300 ha, se encuentra ubicada al norte de la cuenca del río Huallaga, es una región constituida por bosques tropicales asociados a ecosistemas acuáticos (humedales) que históricamente ha sufrido uno de los índices de deforestación más importantes de Perú, (Gerencia de Recursos Naturales y Medio Ambiente. Gobierno Regional de San Martín, 2008), con una extensión deforestada, en los últimos diez años, de unas 230.000 ha aproximadamente.



Figura 1. Localización de la región de San Martín, Perú.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

Para asegurar el total recubrimiento de la región de San Martín se utilizaron las escenas Landsat 5/TM cuya identificación se indica en la Tabla 1. Se analizaron las imágenes de todos los años entre 1998 y 2012 a fin de constituir mosaicos completos con porcentajes de nubes por debajo del 15% para cada una de las fechas.

En consecuencia, los años de estudio seleccionados bajo este criterio fueron 1998, 2000, 2003, 2006, 2008, 2010 y 2011, lo que se consideró un conjunto suficientemente relevante de información tanto en número como en su distribución temporal para acometer el análisis.

Tabla 1.- Identificación de escenas Landsat 5/TM en la región de San Martín.

path	7	7	7	8	8	8	9	9
row	64	65	66	64	65	66	64	65

Para la selección de imágenes se estableció además un criterio de estacionalidad, que asumía la recopilación de imágenes en un periodo homogéneo para cada año, en el que se consideraba la estación seca (de mayo a septiembre) como más apta para el desarrollo del estudio. El resultado de esta selección concluyó que el 71,32% de las escenas pudieron ser seleccionadas en la época seca, según la distribución de escenas que se muestra en la figura 2.

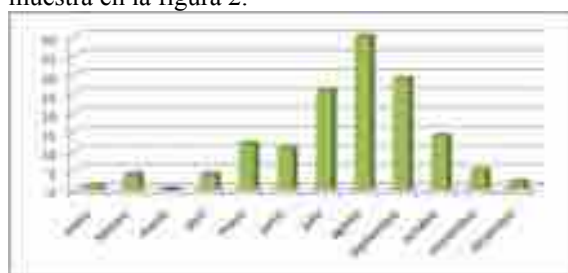


Figura 2. Distribución, por meses, de la época de imágenes Landsat 5/TM seleccionadas (número de imágenes).

A lo largo de la investigación, se examinaron un total de 774 escenas Landsat 5/TM, con un nivel de procesamiento L1T, de las cuales se procesaron 404 y finalmente fueron utilizadas 148 escenas para el estudio.

3.1. Cálculo de la reflectancia y enmascaramiento

Para la obtención de las imágenes de reflectancia se han realizado los siguientes procesos: i) calibración radiométrica, ii) corrección atmosférica y iii) enmascaramiento. Para la conversión de valores digitales en unidades de radiancia se utilizaron factores de ganancia y compensación, obtenidos a partir del propio proveedor de imágenes Landsat 5/TM (USGS). Para minimizar el efecto de la perturbación atmosférica se utilizó el Modelo de Transferencia Radiactiva 6S (Vermote et al., 1997), que permite simular la atmósfera de la Tierra para cada imagen de satélite Landsat 5/TM utilizada en el estudio, mediante la búsqueda de tablas de referencia de datos del sensor MODIS. El enmascaramiento de agua se realizó mediante la detección de la disminución de la reflectancia desde el azul (~ 400 nm) al infrarrojo cercano (>800 nm). Las nubes en las imágenes Landsat 5/TM se enmascararon utilizando la banda térmica de Landsat, y las sombras de las nubes y orografía también se enmascararon por la identificación de píxeles que aparecen en la imagen de reflectancia con valor negativo. El resultado de proceso fue la obtención de 148 imágenes de reflectancia (Figura 2), correspondientes a las ocho escenas Landsat 5/TM definidas, compuestas por seis bandas espectrales: (R, G, B, NIR, Infrarrojo y SWIR). Todas ellas presentaban áreas de enmascaramiento por exclusión de las zonas anteriormente expuestas.



Figura 2. Imagen original (3,2,1) L5/TM 008-065. de 30/06/1998.(izqda.) y su correspondiente producto de reflectancia (5,4,3). (dcha.)

3.2. Cálculo de la cobertura fraccional

A partir de los mosaicos de reflectancia se procedió a la obtención de la cobertura fraccional a nivel de subpíxel. Los caracteres espectrales puros son espectros de referencia que se escogen como los representantes puros de un material de superficie dado, y abarcan la variabilidad espectral dentro de ese material de la superficie. Estas bibliotecas, derivadas de extensas bases de datos de campo e imágenes de satélite, se usan para descomponer cada píxel de una imagen usando la siguiente ecuación lineal (Asner G. et al., 2009):

$$\rho(\lambda)_{\text{pixel}} = \sum [C_e \cdot \rho(\lambda)_e] + \epsilon = [C_{pv} \cdot \rho(\lambda)_{pv} + C_{npv} \cdot \rho(\lambda)_{npv} + C_{sustrato} \cdot \rho(\lambda)_{sustrato}] + \epsilon \quad (3)$$

donde,

- $\rho(\lambda)_e$ es la biblioteca de firmas de reflectancia (e) en la longitud de onda λ , y
- ϵ es un término de error.

Para desagregar la información de los píxeles de cada imagen, éstos se relacionaron con las librerías espectrales implementadas en la herramienta CLASlite para bosques tropicales, de acuerdo a las tres clases definidas (Asner G. et al., 2009):

- VF (Vegetación Fotosintética): representa la vegetación viva, con propiedades espectrales únicas asociadas a los pigmentos fotosintéticos de las hojas, el contenido de agua del dosel y la cantidad de follaje en el dosel, generada a partir de imágenes procedentes del sensor hiperespectral Hyperion (Ungar et al., 2003).
- VNF (Vegetación No Fotosintética): representa la vegetación muerta o senescente. Recopiladas, al igual que el sustrato suelo (S), desde el año 1996 con espectrómetros de campo registrando la reflectancia de la superficie en bandas cada 2 nm, entre los 400-2.500 nm. En la actualidad estas librerías constan de unas 400.000 firmas espectrales.
- S (Suelo desnudo): representa el suelo mineral expuesto y materia orgánica. También puede incluir rocas o infraestructura humana, con materiales como ladrillo o cemento.

- Implementación del algoritmo AutoMCU

El algoritmo AutoMCU (*Automated Monte Carlo Unmixing*) (Asner y Heidebrecht, 2002) ofrece un análisis cuantitativo de la cobertura fraccional o porcentual de la vegetación viva y muerta y del sustrato para cada píxel de la imagen. AutoMCU selecciona de forma iterativa un espectro de VF, VNF y S de cada librería espectral, y segrega la reflectancia del píxel en fracciones de cobertura constituyentes. El proceso de selección aleatoria se repite hasta 50 veces o hasta que

la solución converja en un valor medio para cada fracción de cobertura de superficie. En la figura 3 se presenta un ejemplo de un perfil espectral de cobertura fraccional VNF correspondiente a un píxel. Cada color de la imagen representa la presencia de cada tipo de cobertura en cada píxel. Así, los píxeles más verdes tienen un mayor porcentaje de VF, los píxeles amarillos indican la presencia de S y de VF, y los píxeles más azules representan una mayor cobertura fraccional de VNF.

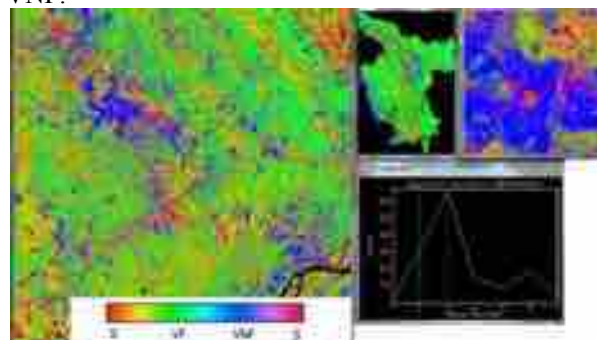


Figura 3. Perfil espectral de cobertura fraccional VNF de un píxel con un valor muy elevado en la banda azul

3.3. Clasificación de la cobertura boscosa

En la etapa de clasificación de la cobertura se convirtieron las imágenes de cobertura fraccional en mapas de cobertura boscosa y no boscosa en función de un árbol de decisiones:

Bosque: $VF \geq 80$ y $S < 20$

Área no boscosa: $VF < 80$ ó $S > 20$

Este árbol de decisión simple para cobertura boscosa, basado en el ajuste por defecto de Sval de 20, es lo suficientemente general para permitir que el algoritmo se ajuste a una amplia variedad de bosques tropicales.

3.4. Detección del cambio de bosque

El objetivo en esta etapa fue la detección del cambio de bosque entre dos imágenes de cobertura forestal entre fechas contiguas del estudio (1998-2000, 2000-2003, 2003-2006, 2006-2008, 2008-2010, 2010-2011). La clasificación de los píxeles en deforestación se realizó basándose en el cumplimiento de los siguientes criterios de inclusión de la cobertura fraccional para cada par de imágenes temporales.

$$(((VF1 - VF2) \geq 25) \text{ ó } ((S1 \leq 5) \text{ y } ((S2 - S1) \geq 15))) \text{ ó } ((VF2 < 80) \text{ y } ((VNF2 - VNF1) \geq 20))) \quad (3)$$

Donde:

VF1 = 1ª imagen fraccional de vegetación fotosintética

VNF1= 1ª imagen fraccional de vegetación no fotosintética

S1 = 1ª imagen fraccional de suelo desnudo

VF2 = 2ª imagen fraccional de vegetación fotosintética

VNF2 = 2ª imagen fraccional de vegetación no fotosintética

S2 = 2ª imagen fraccional de suelo desnudo

4. RESULTADOS

Los resultados de la deforestación en la región de San Martín, (Tabla 2 y Figura 5), determinaron una pérdida

de masa forestal de 300.456 ha, con una media de 18.925 ha/año hasta 2006, año a partir del cual la tasa de deforestación aumenta por encima de las 29.746 ha/año.

Tabla 2.- Cobertura de cambio de bosque por periodo de años consecutivos.

COBERTURA CAMBIO BOSQUE (DEFORESTACIÓN)	total ha	media ha / año
1998-2000	41.049	20.524
2000-2003	52.065	17.355
2003-2006	58.608	19.536
2006-2008	55.521	27.760
2008-2010	61.848	30.924
2010-2011	31.365	31.365
	300.456	



Figura 5. Deforestación media anual (ha/año) en el periodo de estudio.

5. DISCUSIÓN

En el estudio se ha podido comprobar que el cálculo del cambio de la cobertura fraccional de PV, NPV y S entre dos fechas de un periodo permite el establecimiento de la línea histórica de deforestación para ese periodo de una manera fiable. Se detectaron los cambios físicos en la estructura del bosque, no siendo concluyentes las causas de los cambios; las cuales podrían ser consideradas a partir de la combinación de estos resultados con el estudio de factores directos y subyacentes de causalidad a fin de encontrar patrones espaciales y estadísticos de cambios bosque / no bosque y su proyección futura. Los resultados obtenidos se compararon con los siguientes estudios históricos de deforestación:

- “Análisis de cambios en la cobertura arbórea en la región de San Martín para los periodos 2000-2005-2010” (*Conservation International*, 2012), cuyo resultado de deforestación acumulada para todo el periodo fue de 232.718 ha, obteniéndose una diferencia de 2,1%;

- “Cuantificación de la Cobertura de Bosque y Cambio de Bosque a no Bosque de la Amazonía Peruana. Periodo 2000 - 2005 – 2009” y periodo 2010-2011 (Ministerio del Ambiente. Dirección General de Ordenamiento Territorial, 2014), cuya deforestación acumulada fue de 227.115,03 ha, con una diferencia de superficie deforestada de 14,22%.

De acuerdo a los resultados, se considera que el método del Análisis de Mezclas Espectrales, utilizado en el

estudio, fue capaz de proporcionar resultados fiables y totalmente comparables con los estudios anteriormente realizados. Asimismo, se considera que la posibilidad de utilizar librerías específicas de especies forestales amazónicas, implementadas en la herramienta CLASlite, permite trabajar con un alto grado de confianza en la obtención de los resultados.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Asner, G. P., Knapp, D. E., Balaji, A., & Paez-Acosta, G. (2009). Automated mapping of tropical deforestation and forest degradation: CLASlite. *Journal of Applied Remote Sensing* 033543; <http://dx.doi.org/10.1117/1.3223675>. [Accessed 02 April 2011]
- Asner, G.P., Knapp, D.A., Cooper, A.N., Bustamante, M.M.C. & Olander, L.P. (2005). Ecosystem structure throughout the Brazilian Amazon from Landsat Observations and Automated Spectral Unmixing. *Earth Interactions*. 9-7. 1-31.
- Asner, G., & Heidebrecht, K. (2002). Spectral unmixing of vegetation, soil and dry carbon in arid regions: Comparing multispectral and hyperspectral observations. *International Journal of Remote Sensing*. Vol 23-19. 3939-3958.
- Conservation International. (2012). Análisis de Cambio de la Cobertura Forestal de la región San Martín, periodo 2000-2005-2010. Lima: Conservation International.
- Gobierno Regional San Martín. (2008). Plan Forestal Regional de San Martín. Moyobamba: Gerencia de Recursos Naturales y Gestión del Medio Ambiente.
- Griscom, B., Shoch, D., Stanley, B., Cortez, R., Virgilio, N. Implications of methods for establishing baseline forest carbon emissions levels for different non-Annex 1 country circumstances during an initial performance period. Submitted to *Journal of Environmental Science and Policy*, Marzo, 2009
- Moreira de Souza Junior, C., & Nascimento Siqueira, J. V. (2013). ImgTools: a software for optical remotely sensed data analysis. *Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, SBSR*. Foz do Iguaçu, PR, Brasil: INPE.
- Ungar, S., Pearlman, J., M. J., & Reuter, D. (2003). Overview of the Earth Observing One (EO-1) Mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 41-6. 1149-1159.
- Vermote, E. F., Tanre, D., Deuz, J. L., Herman, M., & Morcrette, 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.
- Verchot, L. V., & Petkova, E. (2010). El estado de las negociaciones REDD. Puntos de consenso, opciones para seguir avanzando y necesidades por el programa REDD de las Naciones Unidas. Bogor Barat: Centro para la Investigación Forestal Internacional, CIFOR.