

Clasificación utilizando el modelo lineal de mezcla espectral para la determinación de áreas deforestadas en la Amazonia Peruana

Fernando Joel Diaz Salinas ¹

María Silvia Pardi Lacruz ²

¹ Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial-CONIDA

Calle Luis Felipe Villarán 1069 San Isidro, Lima Perú

¹ joeldiaz@conida.gob.pe

² Campus Brasil/CRECTEALC

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS

Campus UFSM, Av. Roraima 1000, 97105-900, Santa Maria - RS, Brasil

² lacruz@dsr.inpe.br

Abstract. Although Peru is the country with the second extension of forests in South America, it does not have a systematic method for detecting areas of deforestation. The objective of this study is to test a methodology that can be used by the local institutions in charge of assessment of the deforestation areas of the Peruvian Amazon, using satellite images. In the methodological procedure, the TM/Landsat bands 3, 4 and 5 were converted to apparent bidirectional reflectance factor (FBR) and then the linear spectral mixture model was applied to obtain the vegetation, soil and shade fraction images. These fraction images were segmented using a growing region algorithm and then classified by a supervised classifier based on regions. In addition, the apparent bidirectional reflectance factor bands were also segmented and classified using the same algorithm described above, in order to compare the results. The following classes were defined: forest, initial regrowth, advanced regrowth, pasture, pasture with soil, soil, urban area, hydrology and burnt areas. The result shows that both classifications were good, but the one that uses the linear spectral mixture model was more accurate (88.57%) than the original bands (81.43%), with the cover of deforested areas around 12.65% and 12.17% respectively.

Keywords: TM/Landsat image, forest, factor of apparent bidirectional reflectance, deforestation, imagen TM/Landsat, bosque, factor de reflectancia bidireccional aparente, deforestación.

1. Introducción

Perú es el segundo país en Sudamérica, después de Brasil, con mayor cantidad de áreas forestales y dicha riqueza natural viene siendo amenazada debido a la deforestación, actividad que cada vez se realiza en mayores proporciones para diferentes fines de uso (INRENA, 2004). Para el año 1997 se estimó que aproximadamente el 80% de las áreas deforestadas obedecían a la quema de madera con fines agropecuarios, el 17% se deforestó debido a la producción de leña y carbón, y el 3% tuvo su origen en la explotación de la madera con fines comerciales (CONIDA, 2006).

En la actualidad, existen diferentes estudios utilizando el procesamiento de imágenes de satélite para determinar cambios de usos debido a la deforestación (Shimabukuro et al. 1998, Alves et al. 1998, Quirino et al. 2005, Maldonado et al. 2007).

El área de estudio se encuentra en la Región Madre de Dios, entre los distritos de Iñapari e Iberia. Esta área se escogió como estudio piloto, debido a la escasa información actualizada relacionada al tema, teniendo en cuenta que en Perú no existe un monitoreo sistemático de la deforestación, como el que existe en Brasil.

En el Perú existen instituciones como el Instituto Nacional de Recursos Naturales – INRENA y el Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana - IIAP que utilizan la percepción remota en actividades relacionadas con la protección de bosques naturales y en la recuperación de los mismos, pero con ciertas limitaciones para realizar un seguimiento continuo de las actividades que originan la deforestación, debido a la falta de personal calificado e insuficiente presupuesto asignado.

El objetivo principal de este trabajo es comparar los resultados de la clasificación empleando el Modelo Lineal de Mezcla Espectral y de la clasificación de las bandas TM/Landsat 3, 4 y 5 para determinar y cuantificar las áreas deforestadas en el área de estudio. El resultado de esta clasificación será asociado en un futuro, con datos de biomasa obtenidos en trabajos de campo, de manera de definir una metodología que pueda ser aplicada de forma sistemática por las instituciones encargadas del seguimiento de la deforestación en Perú, y que contribuya con la definición de estrategias para contrarrestar las actividades ilegales que la producen. En ello radica la importancia de la generación y transferencia de una metodología que permita desarrollar y optimizar estas actividades.

2. Área de Estudio

El área de estudio corresponde al área adyacente a la carretera que une los distritos de Iñapari e Iberia, localizados en la provincia de Tahuamanu, en la Región Madre de Dios de Perú. El proyecto se localiza entre las coordenadas geográficas $10^{\circ} 54' 59''$ y $11^{\circ} 28' 31''$ de latitud Sur y $69^{\circ} 17' 9''$ y $69^{\circ} 46' 4''$ de longitud Oeste (Figura 1). Esta región se encuentra localizada al noreste de la Región Madre de Dios, limitando por el norte con el Estado de Acre (Brasil) y por el este con el Departamento de Pando (Bolivia).

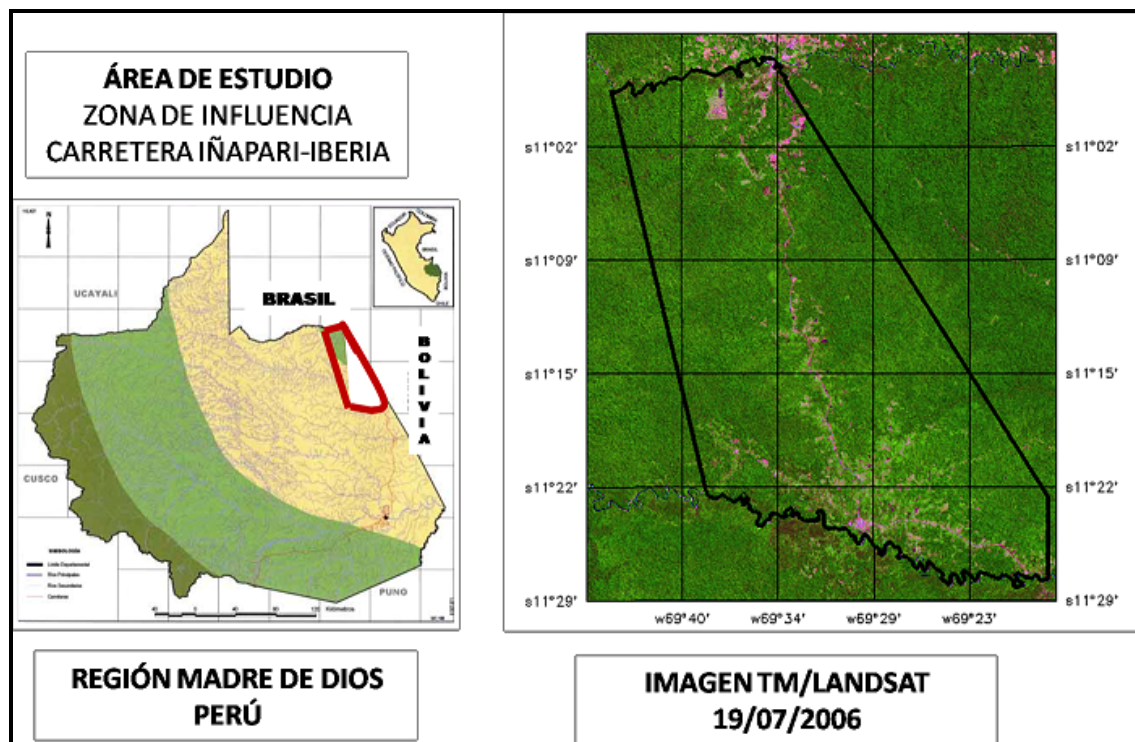


Figura 1. Localización del área de estudio.

La zona de estudio forma parte de una gran cuenca geológica sedimentaria, ubicada entre el Escudo Brasileiro y la faja Sub-Andina y está caracterizada por la presencia de suaves ondulaciones, formadas por material cuaternario acumulado sobre formaciones pre-existentes; es por consiguiente, una depresión tectónica donde se acumularon gruesas secuencias sedimentarias que presentan en superficie pliegues muy suaves (ONERN, 1977).

De manera general, el área de estudio está caracterizada por la presencia de lluvia abundante durante la mayor parte del año, llegándose a diferenciar una larga estación denominada "invierno" de octubre a mayo y una corta estación seca denominada "verano" de junio a septiembre, esta diferencia no llega a influenciar significativamente en el

comportamiento de la vegetación del área. La evaporación registrada en las estaciones meteorológicas de Iberia e Iñapari en período de 1980 a 1989 fue 598,4 mm y 652,6 mm, respectivamente (OEA, 1992).

En esta zonas existe vegetación propia de pacales mixtos, bosques de terrazas disectadas, bosques de colinas bajas y de chacras y purmas, donde la especie *Hevea sp.* (shiringa) es la más sobresaliente (IIAP, 2001).

3. Materiales y Método

Se utilizaron como materiales, la imagen *TM/Landsat* escena 003/068 del 19/07/2006 proporcionada por el INPE (<http://www.dgi.inpe.br/CDSR>), el mosaico Geocover S-19-10_2000 (obtenido de la página de la NASA: <https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid>). El procesamiento de las imágenes se realizó en el *software* SPRING versión 4.3.3.

Como primer paso, se registró la imagen *TM/Landsat* bandas 3, 4 y 5, teniendo como referencia el mosaico Geocover S-19-10_2000. Para esto se tomaron en consideración los siguientes parámetros: ajuste polinomial de primer orden, remuestreo por vecino más próximo, y se obtuvo un error final de 0,845 píxel.

La imagen *TM/Landsat* fue transformada a factor de reflectancia bidireccional (FRB) aparente (Ponzoni y Shimabukuro, 2007) a través de un programa en Lenguaje Espacial para Geoprocesamiento Algebraico - LEGAL, posteriormente se realizó una comparación entre las respuestas de los objetos más representativos (suelo, vegetación y agua) en niveles digitales (ND) y FRB aparente con los comportamientos espectrales teóricos de dichos objetos (Novo, 2008).

El siguiente paso consistió en aplicar el modelo lineal de mezcla espectral (MLME) a las bandas 3, 4 y 5 de la imagen *TM/Landsat* en FRB aparente, seleccionando el método de mínimos cuadrados ponderados para obtener las imágenes fracción vegetación, suelo y sombra (Ponzoni y Shimabukuro, 2007), tomando los valores de los píxeles puros de los objetos antes mencionados, de acuerdo a la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de reflectancia aparente seleccionados para los componentes puros del modelo lineal de mezcla espectral.

Componentes Puros	Banda 3	Banda 4	Banda5
Suelo	0,263	0,329	0,431
Vegetación	0,071	0,404	0,173
Sombra	0,071	0,039	0,012

Las imágenes fracción obtenidas fueron segmentadas por crecimiento de regiones, con umbrales de similitud de 6 y área de 20. En la etapa de clasificación se usó el algoritmo supervisado basado en la distancia de Battacharya, suministrando muestras de entrenamiento que fueran representativas para cada clase, con un umbral de aceptación de 95%. Para la definición de las muestras de entrenamiento se utilizó como apoyo la imagen de alta resolución del área en estudio disponible en el Google Earth, del mismo año de la imagen *TM/Landsat*. Los temas resultantes de la clasificación fueron asociadas a las siguientes clases: bosque, regeneración inicial, regeneración avanzada, pasto con suelo, pasto denso, suelo expuesto, quemada, hidrografía y área urbana.

Adicionalmente se clasificaron las bandas 3, 4 y 5 de la imagen *TM/Landsat* en FRB aparente, teniendo en cuenta las muestras obtenidas en la clasificación con el modelo lineal de

mezcla espectral. Asimismo, para realizar la comparación entre las clasificaciones se tomaron 70 muestras basadas en la interpretación visual realizada sobre la imagen de alta resolución del *Google Earth*.

4. Resultados y Discusión

Luego del proceso de clasificación se pudo apreciar que la clasificación supervisada por regiones de los componentes suelo, vegetación y sombra, generó buenos resultados respecto al uso y cobertura del suelo, en el caso particular del área de estudio las imágenes fracción facilitaron la determinación de las diferentes clases.

Al comparar los comportamientos de los objetos en niveles digitales y factor de reflectancia bidireccional aparente se pudo comprobar que los valores del FRB aparente representaban mejor el comportamiento de dichos objetos, así como que permitieron una mejor separabilidad de clases en el momento de clasificar.

La Figura 2 representa las imágenes fracción suelo, vegetación y sombra, y la composición en color RGB de las imágenes fracción, antes mencionadas. La imagen fracción suelo permite apreciar el suelo expuesto y las carreteras, la imagen fracción vegetación permite diferenciar las áreas de regeneración o de sucesión secundaria y en la imagen fracción sombra es posible apreciar las áreas deforestadas. La composición en color de las imágenes fracción (suelo, vegetación y sombra) muestra las diferentes alteraciones en el bosque, en ese sentido, se diferencia mejor las clases determinadas respecto a las imágenes fracción de forma individual, como por ejemplo, se puede distinguir las diferentes etapas de regeneración (inicial y avanzada) y pastos (con suelo y densos).

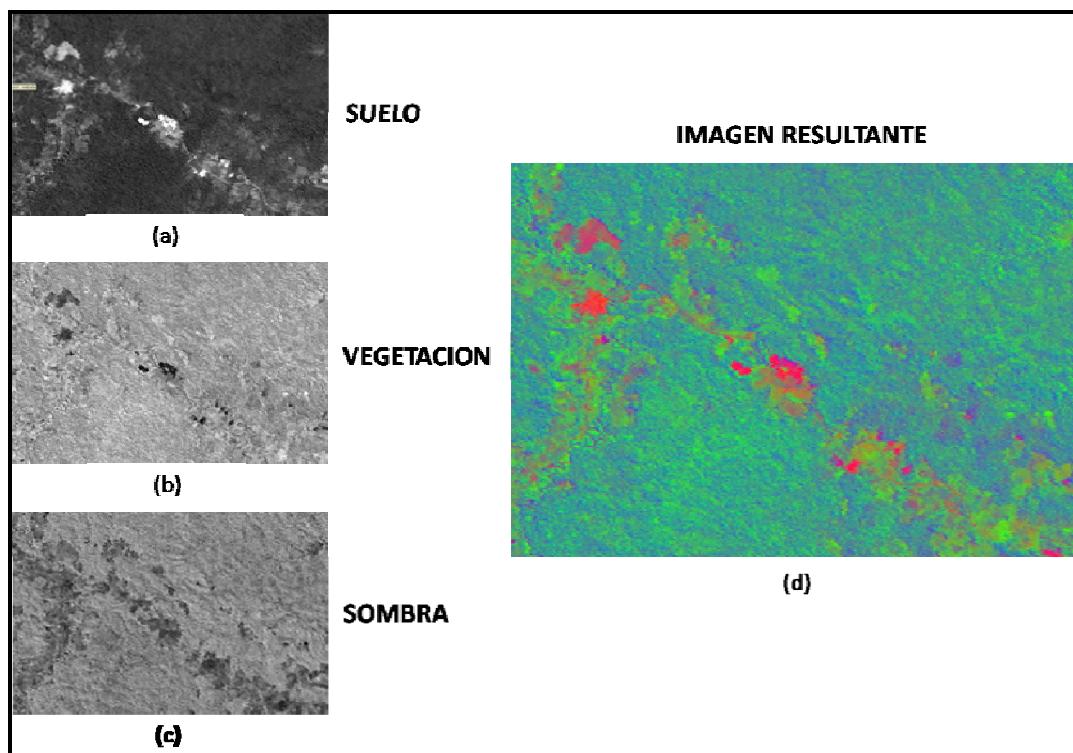


Figura 2. (a) Imagen fracción suelo, (b) imagen fracción vegetación, (c) imagen fracción sombra (d) imagen colorida RGB (suelo, vegetación, sombra).

Como resultado de la clasificación realizada sobre las imágenes fracción, se puede apreciar que la clase bosque tiene 133.322,31 ha, lo que representa el 87,35% del área total, así como gran cantidad de áreas abandonadas donde se observa el incremento de áreas de

regeneración con un total de 7.709,55 ha, lo que representa el 7,02% del área. Asimismo, en la Tabla 2 se puede apreciar la medida de las clases, mostrando que en el modelo de mezcla se clasificó un 12,65% de áreas deforestadas. Se puede determinar también que los distritos de Iberia e Iñapari se desarrollan dentro del sector agropecuario.

Tabla 2. Medida de clases de la clasificación efectuada con el modelo lineal de mezcla espectral

	Modelo Lineal de Mezcla Espectral	
	Medida (ha)	Porcentaje (%)
Bosque	133.322,31	87,35
Regeneración inicial	3.360,33	2,20
Regeneración avanzada	7.349,22	4,82
Área urbana	268,20	0,18
Suelo	1.023,03	0,67
Pasto con suelo	2.775,33	1,82
Pasto denso	4.088,70	2,68
Quemada	251,01	0,16
Hidrografía	189,27	0,12
TOTAL	152.627,40	100,00

La Figura 4 muestra la clasificación de uso y cobertura resultante de la clasificación del MLME; en esta imagen se puede apreciar que la proximidad a áreas urbanas ejerce una mayor influencia en los cambios de uso y cobertura del suelo que la carretera que une Iñapari a Iberia. En este caso Iberia ejerce mayor presión respecto a Iñapari, siendo una ciudad más grande y apreciándose que en sus proximidades existe la mayor cantidad de regeneración del área de estudio y predomina frente a las áreas de pastos, asimismo, la acción antrópica se dio en todas las direcciones.

Asimismo, siendo Iñapari la ciudad más cercana a la frontera con Brasil y Bolivia, no ha sufrido la fuerte influencia en aspectos de deforestación como la recibida en Iberia que se encuentra más cercana al distrito de Puerto Maldonado, capital de la Región Madre de Dios.

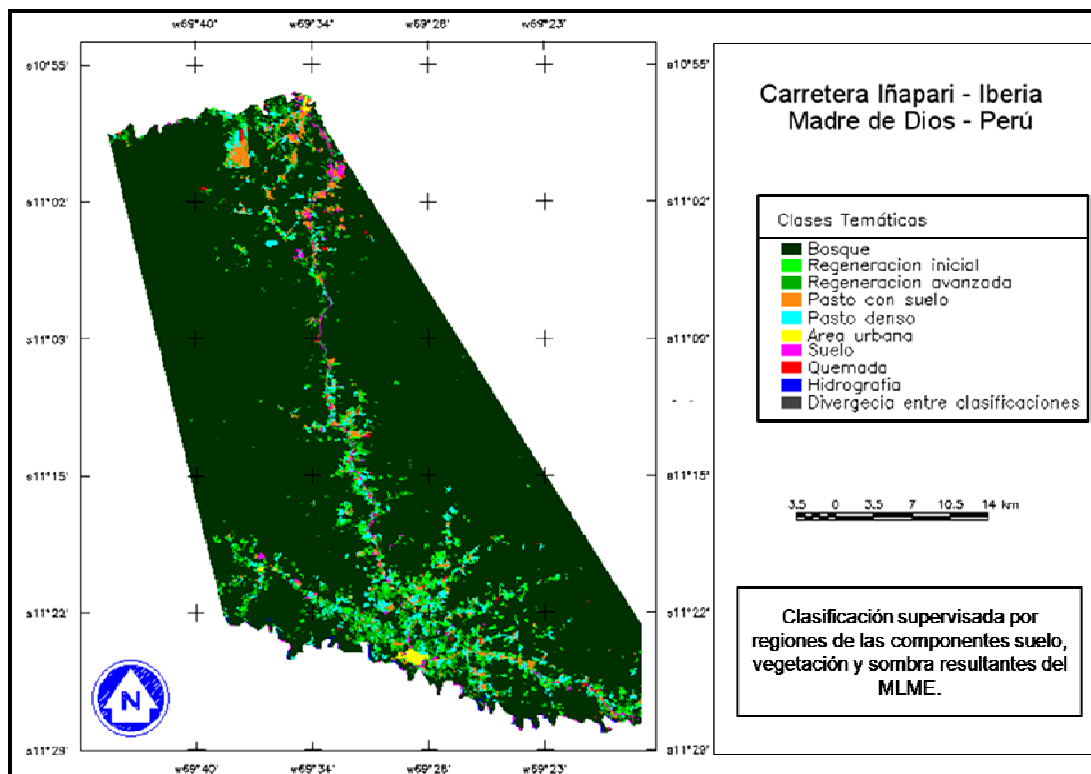


Figura 3. Clasificación supervisada por regiones de las componentes suelo, sombra y vegetación resultantes del modelo lineal de mezcla espectral.

Como resultado de la comparación de las muestras obtenidas de la interpretación visual apoyada en la imagen del *Google Earth*, se puede comprobar que la clasificación obtenida con el MLME tiene una mayor exactitud (89,57%) respecto a la clasificación de las bandas originales (81,43%) según lo mostrado en la Tabla 3. En este punto se debe tener en cuenta que las muestras consideradas la clasificación de las bandas 3, 4 y 5 tuvieron como base la experiencia obtenida en la clasificación de los componentes resultantes del MLME, facilitando el reconocimiento e interpretación de los objetos en dicha clasificación.

Tabla 3. Comparación de las clasificaciones según las muestras obtenidas de la interpretación visual.

	Modelo Linear de Mezcla Espectral		Bandas 3, 4 y 5	
	Correctas	Confusión	Correctas	Confusión
Bosque	9	0	9	0
Regeneración inicial	9	1	9	1
Regeneración avanzada	7	3	3	7
Área urbana	3	0	3	0
Suelo	7	1	7	1
Pasto con suelo	7	1	8	0
Pasto denso	6	2	5	3
Quemada	10	0	9	1
Hidrografía	4	0	4	0
TOTAL	62	8	57	13
Porcentaje (%)	88,57	11,43	81,43	18,57

Como se puede comprobar en la tabla anterior, la clasificación de las bandas 3, 4 y 5 no permite identificar la regeneración avanzada, presentando mayormente confusión con el bosque (Figura 4).

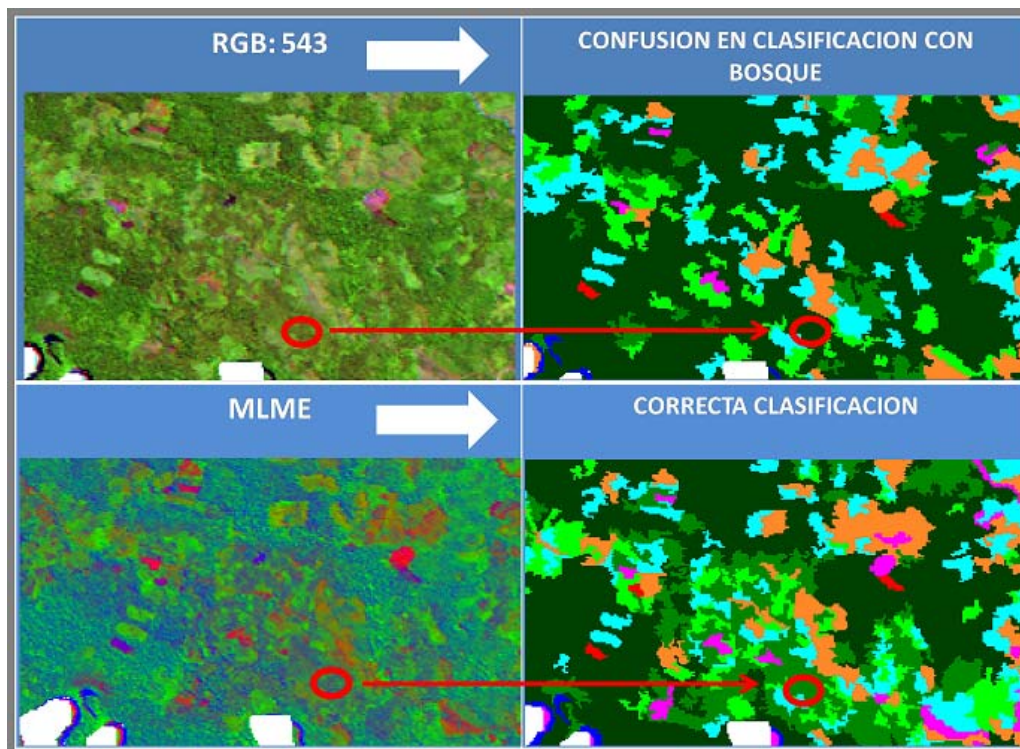


Figura 4. Confusión en la clasificación de las bandas 3, 4 y 5.

5. Conclusiones

El uso de las fracciones vegetación, suelo y sombra resultantes del modelo lineal de mezcla espectral así como de las bandas 3, 4 y 5 de imágenes *Landsat* para la clasificación de áreas deforestadas presentan un buen desempeño en la determinación de clases, aunque el modelo de mezcla presentó mayor precisión.

De manera de determinar con mayor exactitud los resultados y poder orientarlos a un estudio de cuantificación de biomasa, se hace necesario datos de campo, con la finalidad de poder determinar mejor las clases presentes en el área y poder establecer mejores relaciones con los datos biofísicos.

El uso de metodologías aplicadas a la percepción remota de forma sistemática para el control de la deforestación en el Perú se hace cada vez más crítico, en ese sentido, el uso de transformaciones radiométricas como el modelo lineal de mezcla espectral representa una solución con un alto grado de precisión para el cumplimiento de la sistematización deseada.

Referencias Bibliográficas

Alves, D. S.; Pereira, J. L. G.; Sousa, C. L.; Soares, J. V.; Moreira, J. C.; Ortiz, J. O.; Shimabukuro, Y. E.; Yamaguchi, F. Análise comparativa de técnicas de classificação de imagens do sensor Landsat/TM para caracterização de áreas desflorestadas. In: Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 9., 1998, Santos. Anais... São José dos Campos: INPE, 1998. p. 1409-1420. CD-ROM. ISBN 85-17-00015-3. (INPE-6911-PRE/2877). Disponible en: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/deise/1999/02.09.09.16>>. Acceso: 21 set. 2008.

Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial. Estudio de Preinversión a nivel de Perfil "Implementación del Sistema Nacional de Teledetección Espacial". Perú, 2006, 257 p.

Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana. Madre de Dios camino al desarrollo sostenible, propuesta de zonificación ecológica económica como base para el ordenamiento territorial, Perú, 2001, 153 p.

Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA). Plan Estratégico Institucional 2004-2006. Disponible en: <http://www.inrena.gob.pe/gestinst/gestion/pei2004-2006/pei2004-2006.pdf>. Acceso: 12 oct. 2008.

Maldonado, M. J. D. L. R.; Brown, I. F.; Valeriano, D. M.; Duarte, V. Modificações no método do PRODES para estimar a mudança da cobertura florestal na Bacia Trinacional do Rio Acre na região de fronteira entre Bolívia, Brasil e Peru na Amazonia Sul-ocidental. In: SIMPÓSIO Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 13., 2007, Florianópolis. Anais... São José dos Campos: INPE, 2007. p. 5903-5910. CD-ROM; On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. Disponível en: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.23.24>>. Acceso: 06 oct. 2008.

Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales. Inventario, evaluación e integración de los recursos naturales de la zona Iberia-Iñapari. Perú, 1977, 418 p.

Organización de los Estados Americanos. Programa de Desarrollo Integrado de las Comunidades Fronterizas Peruano-Brasileñas. Disponible en: <<http://www.oas.org/dsd/publications/Unit/oea09s/begin.htm#Contents>> Acceso: 18 oct. 2008.

Ponzoni, F. J.; Shimabukuro, Y. E. Sensoriamento Remoto no estudo da vegetação. São José dos Campos: Parêntese, 2007, 127 p.

Quirino, V. F.; Santos, J. R.; Maldonado, F. D.; Carvalho, V. C. Técnica de Rotação Radiométrica de Imagens Landsat/TM como ferramenta de detecção de Mudanças da Paisagem na Amazônia. IV Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas – IV CBCG, 2005, 5 p.

Shimabukuro, Y. E.; Batista, G. T.; Mello, E. M. K.; Moreira, J. C.; Duarte, V. Using shade fraction image segmentation to evaluate deforestation in Landsat Thematic Mapper images of the Amazon Region. International Journal Remote Sensing, 1998, vol. 19 N° 3, p 535-541