

Desarrollo de una metodología para el mapeo de humedales alto Andinos en la bioregión Jalca empleando imágenes de satélite

Walter Martín Leyva Molina^{1,2}

E-mail: martin.leyva.molina@gmail.com / walter.leyva@unmsm.edu.pe

Bram Leo Willems^{1,2}

E-mail: bwillems@unmsm.edu.pe / bwillems@cca.org.pe

Raúl Arnaldo Espinoza Villar^{1,2}

respinozavillar@gmail.com

¹Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Ap. Postal 14-0149, Lima 14, Perú

²Centro de Competencias del Agua, Av. La Molina S/N, La Molina, Lima 12, Perú

Resumen. Los humedales alto Andinos (HAA) son ecosistemas que se ubican en cabeceras de cuencas Andinas. Tienen la capacidad de almacenar el agua proveniente de las precipitaciones para recargar depósitos subterráneos y generar un flujo continuo cuenca abajo. Por su importancia, es necesario desarrollar mayor conocimiento sobre su distribución y extensión a lo largo de los Andes Tropicales, donde se encuentran ubicados a grandes altitudes (> 3000 m.s.n.m.) y en zonas de difícil acceso. Existen trabajos que reportan metodologías de mapeo de HAA que emplean índices espectrales, pero debido a las características geográficas y meteorológicas de la bioregión Jalca, no es posible replicarlas en dicha región. Ante este vacío, esta investigación reporta los resultados de una metodología propuesta para el mapeo de HAA de la bioregión Jalca, analizando datos imágenes de los sensores TM, ETM+ y OLI de la misión Landsat. La metodología propuesta inicia con un pre-procesamiento de las imágenes obtenidas (corrección radiométrica y atmosférica). Una vez obtenida la imagen de reflectancia del suelo, se aplicó una transformación *tasseled cap* (TCT) para obtener las bandas de brillo, verdor y humedad, las cuales al ser colocadas en una combinación RGB permitieron identificar los HAA. Luego de un proceso de clasificación supervisada por máxima verosimilitud, se logró mapear 759.87 ha de HAA de un área total de 3,736.9 ha. El proceso de validación se realizó empleando información de campo y se expresó a través de una matriz de error con una fiabilidad de 96.1187%.

Palabras claves: Humedales Altoandinos (HAA), Jalca, Landsat, Transformación *tasseled cap* (TCT).

Abstract. High Andean wetlands (HAA) are ecosystems located in headwaters of Andean basins. They have the capacity to store water from precipitation, to recharge underground deposits and generate a continuous flow basin down. Due to its importance, it is necessary the development of knowledge about its distribution and extension along the tropical Andes, where they are located at high altitudes (> 3000 m.s.n.m.) and in difficult access areas. There are studies that report HAA mapping methodologies that use spectral indexes, but due to the geographic and meteorological characteristics of the jalca bioregion, it is not possible to replicate them in this region. In front of this gap, this research proposed a methodology for the HAA mapping of the Jalca bioregion, analyzing data images of the TM, ETM + and OLI sensors of the Landsat mission. The methodology proposed starts with a pre-processing of the images obtained (radiometric and atmospheric correction). Once the image of soil reflectance was obtained, a tasseled cap transformation (TCT) was applied to obtain the bands of brightness, greenness and wetness, which when placed in an RGB combination allowed to identify the HAA. After a supervised classification process by maximum likelihood, it was possible to map 759.87 ha of HAA of a total area of 3,736.9 ha. The validation process was performed using field information and was expressed through an error matrix with a reliability of 96.1187%.

Key words: High Andean Wetland, Jalca, Landsat, Tasseled Cap Transformation.

1. Introducción

Las cabeceras de las cuencas Andinas están conformadas por diferentes ecosistemas, tales como glaciares, nevados, laguna, bosques y humedales, los cuales se encuentran distribuidos en las bioregiones de puna, jalca y páramo a lo largo de los Andes tropicales (Convención de Ramsar y Grupo de Contacto EHAA, 2008; Ochoa-Tocachi et al. 2016). Los humedales alto Andinos (HAA) son los ecosistemas que se encuentra presente en las tres bioregiones, brindando diversos servicios ecosistémicos, entre los que principalmente resalta su capacidad de almacenar el agua proveniente de las precipitaciones, para recargar depósitos subterráneos y generar un flujo continuo en la cuenca (Buytaert et al. 2006), de esta manera cumplen funciones de regulación hídrica, biorremediación, y son hábitat de una gran diversidad de flora y fauna.

Si bien la mayor parte de las cuencas del Perú, en particular aquellas de la vertiente hidrográfica del Pacífico, dependen de los ecosistemas de humedales para la disponibilidad del recurso hídrico, es aún muy limitado los estudios existentes sobre éstos, en cuanto a su distribución y extensión, debido principalmente a que se encuentran ubicados a grandes altitudes (> 3500 m.s.n.m.) y en zonas de difícil acceso. Además son considerados sistemas frágiles ante causas naturales (ejemplo: extensas sequías) y antrópicas (ejemplo: agricultura no sostenible, pastoreo excesivo y minería no sostenible), de esa manera muchos se están perdiendo aceleradamente sobre todo por mal manejo y desconocimiento de su importancia económica y ecológica (Tovar et al. 2013).

Una alternativa la constituyen los datos-imágenes de satélite, como ya se ha demostrado en la bioregión Puna, permiten conocer la distribución y expansión de HAA (García y Otto 2015; García y Llellish 2012; Otto et al. 2011), pero debido a las diferentes características geográficas y meteorológicas de la Jalca, se requiere desarrollar nuevas metodologías. El presente trabajo tiene por objetivo desarrollar y validar una metodología que permita identificar y mapear HAA en la bioregión Jalca empleando imágenes satelitales de libre acceso.

2. Metodología de Trabajo

2.1 Área de estudio

El área de estudio es una sección de la cabecera de cuenca Chancay – Lambayeque ubicada en el distrito de San Juan de Licupis de la provincia de Chota en el departamento de Cajamarca, entre los departamentos de Lambayeque y Cajamarca en el norte del Perú, esta se encuentra en las coordenadas geográficas 6° 20' y 6° 56' Latitud Sur y 78° 38' y 80° 00' Longitud Oeste. En la Figura 1, se muestra la ubicación del área de estudio.

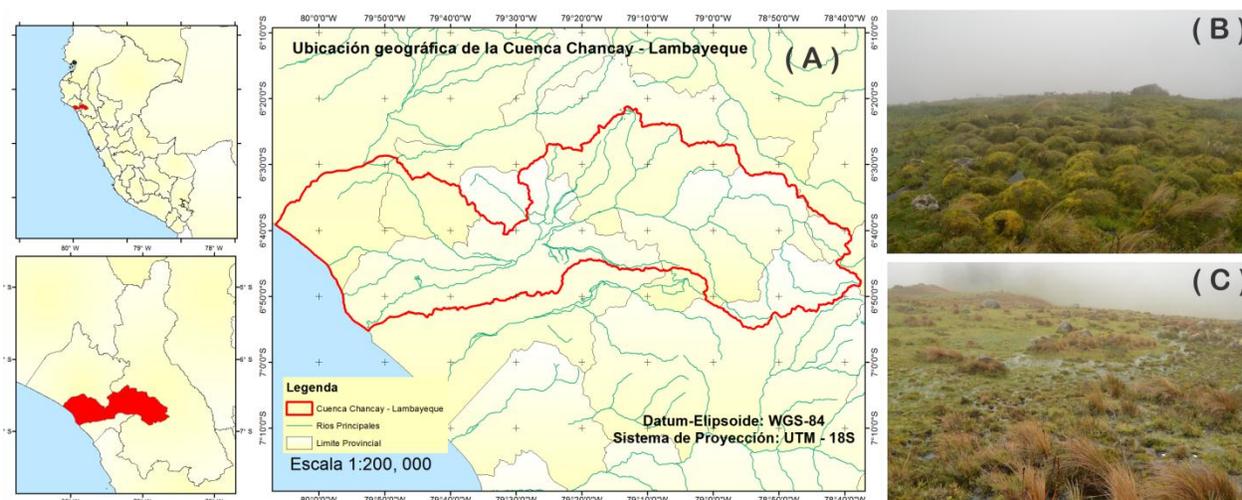


Figura 1. (A) Ubicación del área de estudio: cabecera de cuenca Chancay – Lambayeque en San Juan de Licupis, (B), (C) HAA de la bioregión Jalca.

2.2 Datos

En el presente estudio, se han utilizado imágenes Landsat de los sensores *Thematic Mapper* (TM), *Enhanced Thematic Mapper más* (ETM+) y *Operational Land Imager* (OLI), estas tienen una resolución espacial de 30 m y se encuentran disponibles en la web del *Global Visualization Viewer* (Glovis): <http://glovis.usgs.gov/>, la cual maneja el archivo de datos Landsat del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). El área de interés tiene una extensión de 62.18 km², esta fue extraída de la escena 10/64. Así mismo, se ha empleado el modelo digital de elevación ASTER GDEM (*ASTER Global Digital Elevation Model*) con resolución espacial de 30 metros y, que se encuentran disponibles en la web (<http://gdem.ersdac.jp/>).

2.3 Metodología

La metodología desarrollada inicia con la adquisición de las imágenes del sensor TM, ETM+ y OLI del satélite Landsat, para continuar con el pre-procesamiento y procesamiento de las imágenes, aplicación de la transformación *tasseled cap* (TCT), realizar la clasificación de la cobertura de superficie y realizar una validación con información de campo.

En primer lugar convertimos en unidades físicas (radiancia y reflectancia) a los valores digitales (productos Landsat de nivel 1) que representan a cada píxel, es decir realizar el pre-procesamiento de las imágenes, para ello realizamos la calibración radiométrica, empleando las ecuaciones y factores descritos por Chander et al. (2009). La corrección atmosférica se realizó utilizando el Módulo FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*), que es una herramienta de modelado de principios básicos para recuperar la reflectancia espectral a partir de la radiancia de imágenes espectrales y de esa manera compensar con precisión los efectos atmosféricos.

Una vez obtenida la imagen de reflectancia de superficie, se procede a la aplicación de la TCT, que es una transformación especial desarrollada originalmente por Kauth y Thomas (1976). Esta transformación es un especial de análisis de componentes principales que transforma los datos de imagen a un nuevo sistema de coordenadas con un nuevo conjunto de ejes ortogonales. De esa



manera, proporciona nuevas bandas con un significado físico, que permiten detectar y comparar los cambios en la vegetación, el suelo y en las características producidas por el hombre en períodos de corto y largo plazo. Así mismo, reduce la cantidad de datos de varias bandas multiespectrales a solo tres componentes principales: Brillo (B), Verdor (V) y Humedad (V) y además reduce las influencias atmosféricas y los componentes de ruido en las imágenes, permitiendo un análisis más preciso. Para su aplicación se empleó el conjunto de coeficientes de la ecuación 1 y que fueron reportados por Baig et al. (2014).

$$\begin{bmatrix} B \\ V \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3029 & 0.2786 & 0.4733 & 0.5599 & 0.508 & 0.1872 \\ -0.2941 & -0.243 & -0.5424 & 0.7276 & 0.0713 & -0.1608 \\ 0.1511 & 0.1973 & 0.3283 & 0.3407 & -0.7117 & -0.4559 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} OLI 2 \\ OLI 3 \\ OLI 4 \\ OLI 5 \\ OLI 6 \\ OLI 7 \end{bmatrix} \quad (1)$$

La banda B: Brillo (eje principal), relacionada con los cambios de reflectividad de la imagen. Es la suma ponderada de todas las bandas y está asociado con el suelo descubierto o parcialmente cubierto, hecho por el hombre, y las entidades naturales como el concreto, el asfalto, la grava, los afloramientos de roca y otras áreas descubiertas. La banda V: Verdor (ortogonal al primer componente), definida por el contraste entre visible e infrarrojo, con ponderación positiva de bandas 4-5 y negativa del resto, debido a que está asociado con la vegetación verde. La banda H: Humedad (ortogonal a los primeros dos componentes), tiene ponderación negativa en el infrarrojo medio y está relacionada con el contenido de humedad de vegetación y suelo, el agua y otras entidades húmedas.

Posterior a la aplicación de la TCT, se realizó un proceso de clasificación supervisada por el método de Máxima Verosimilitud, definiendo las clases de acuerdo a lo listado en la Tabla 1.

Tabla 1. Tipos de Cobertura establecidas para la Clasificación

Nº	Código	Cobertura
1	HAA	Humedal Altoandino
2	ARB	Arbusto
3	BOS	Bosque
4	SUE	Suelo
5	AGA	Agua

Previo a la ejecución de la clasificación se realizó el análisis de la separabilidad de las clases establecidas, para comprobar si dos o más clases son muy similares, ya que sería probable que hubiera confusión entre ellas. El análisis de separabilidad realizado con el método de la divergencia transformada para las cinco clases. Se obtuvo una separabilidad promedio de 1.924349748 que resulta ser adecuada, teniendo en cuenta que valores por debajo de 1.7000

indican una pobre separabilidad, entre 1.9000 y 2.0000 indican una separabilidad adecuada y 2.0000 una separabilidad idónea. La mínima separabilidad se da entre ARB y BOS (1.53208201).

3. Resultados y Discusión

3.1 Identificación y mapeo de HAA

La Figura 2 muestra el resultado obtenido de la clasificación realizada a partir de la imagen compuesta por las bandas TCT en el área piloto. Se identificaron 759.87 ha de HAA de un área total de análisis de 3,736.9 ha, conformando el 20.34%.

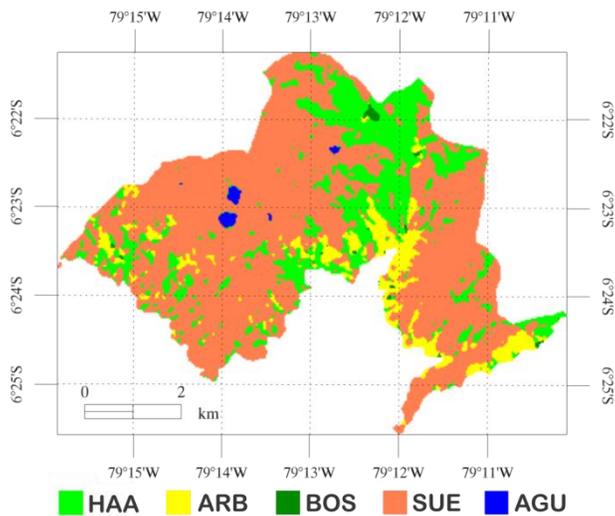


Figura 2. Mapeo de HAA en el área de estudio para el 2 de noviembre del 2015.

En la Figura 3 (A), se muestra las firmas espectrales de las clases mapeadas, donde podemos apreciar un comportamiento espectral similar para las clases HAA, ARB y BOS, pero la clase HAA marca una mínima diferencia en las bandas del infrarrojo cercano (banda 5) y medio (banda 6 y 7) debido a su mayor reflectancia en estas bandas. Así mismo en la Figura 3 (B), se muestra la distribución de valores en las bandas TCT para las clases mapeadas, donde vemos que la clase HAA marca distancia con las clases ARB y BOS en la banda de Brillo, y es a partir de este factor que se diferencia de dichas clases pese a que en las bandas de Verdor y Humedad poseen valores próximos debido a la presencia de vegetación saludable con contenido de agua permanentemente, lo cual varía de manera mínima debido a sus características geográficas y meteorológicas (humedad y precipitación horizontal).

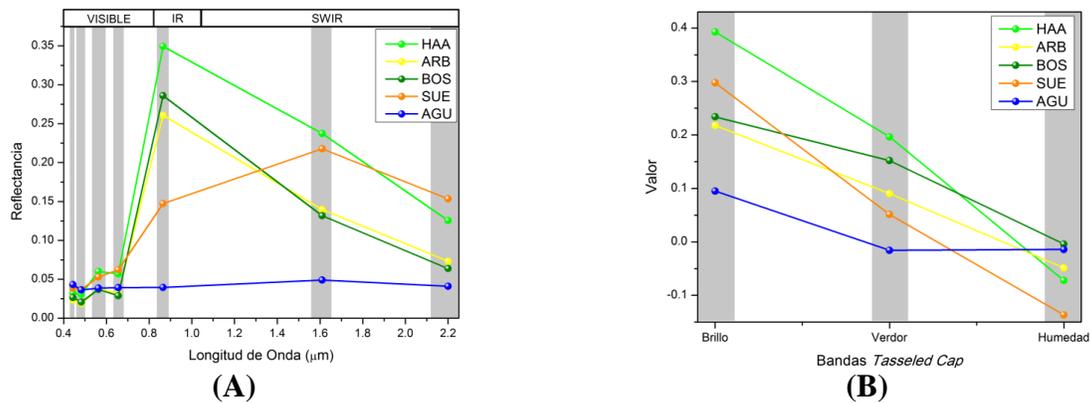


Figura 3. (A) Firmas Espectrales de las Clases Mapeadas (B) Comportamiento de las Clases Mapeadas TCT

En la Figura 4, se presentan los diagramas de dispersión de las bandas TCT, cada combinación de ellas representa un plano de análisis. La Figura 4 (A) representa el Plano de Vegetación, la Figura 4 (B) muestra el Plano de Suelos y la Figura 4 (C) representa la Zona de Transición. Estos tres planos nos muestran la distribución de valores de los HAA y además de las otras clases consideradas en la clasificación, las cuales están de acuerdo con los planos ya reportados en Baig et al. (2014).

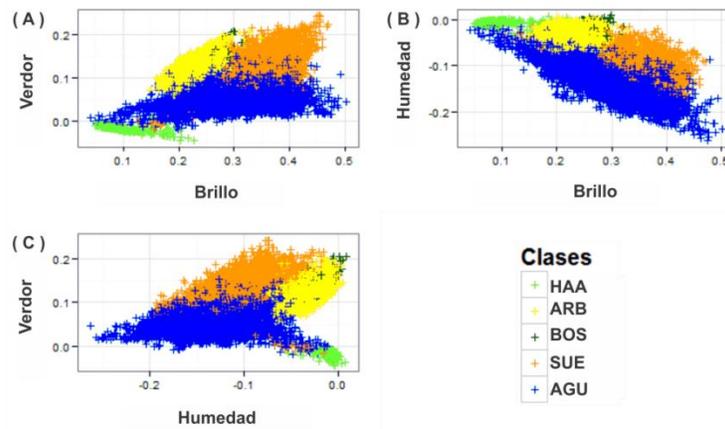


Figura 4. Diagramas de Dispersión de las clases mapeadas en el área de estudio.

3.2 Validación del mapeo

El proceso de validación se realizó por medio de la comparación en una matriz de error de las clases obtenidas en la clasificación desarrollada en esta metodología con respecto a la información recolectada en campo y complementada con las imágenes de satélite de alta resolución del programa *Google Earth*. La matriz de error generada se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Matriz de Error para las clases determinadas

	HAA	ARB	BOS	SUE	AGU	Total	Error Comisión (%)	Exactitud del usuario (%)
HAA	74	0	3	0	0	77	3.90	96.10
ARB	0	112	1	0	0	113	0.88	99.12
BOS	0	0	16	0	0	16	0.00	100.00
SUE	0	12	0	192	1	205	6.34	93.66
AGU	0	0	0	0	27	27	0.00	100.00
Total	74	124	20	192	28	438		
Error de Omisión (%)	0.00	9.68	20.00	0.00	3.57			
Exactitud del Productor	100.00	90.32	80.00	100.00	96.43			

Los datos en la diagonal principal indican las áreas que han permanecido clasificadas para cada clase en ambos mapas, mientras que aquellas que se encuentran fuera de la diagonal principal, representan el cambio de asignación del pixel de un mapa a otro en forma de ganancia, si se encuentra en las filas, o pérdida si se encuentra en las columnas. Los valores que presentan cambio de asignación, ya sea porque perteneciendo a una misma clase han sido asignadas a categorías distintas (error de omisión) o porque han sido clasificadas en una categoría cuando en realidad pertenecen a otra (error de comisión). La matriz de confusión resultante de la clasificación contra los datos de verdad obtuvieron resultados de fiabilidad de entre 96.1187%. El índice de Kappa (k) obtenido fue de 0.9435, lo cual indica un acuerdo pleno entre la realidad y el mapa.

A diferencia de las metodologías de mapeo de HAA en la bioregión Puna ya reportados en la literatura (García y Otto, 2015; García y Llellish, 2012; Otto et al. ,2011), donde emplean principalmente índices espectrales como el NDVI, NDWI, NDII e incluso han definido subtipos de HAA de acuerdo a su dinámica Otto et al. (2011). La metodología presentada en este trabajo permite tomar en cuenta los efectos de las características meteorológicas y geográficas de la bioregión Jalca, los cuales generan una confusión entre diversos tipos de cobertura vegetal como son los arbustos, bosques, áreas agrícolas y demás, ya que en muchos casos colindan y hasta a veces se traslapan. A partir de los resultados obtenidos de las imágenes de satélite y de su validación en campo, se muestra que la metodología desarrollada en este estudio nos permitió delimitar HAA en la bioregión Jalca.

4. Conclusiones

Los resultados de la metodología desarrollada identificaron 759.87 ha de HAA de un área total de análisis de 3,736.9 ha, conformando el 20.34% con una fiabilidad de 96.1187% en un sector de la cabecera de Cuenca Chancay – Lambayeque (San Juan de Licupis).

La identificación de HAA, no puede estar definida por una única metodología, ya que el proceso de identificación va a depender de las características geográficas y meteorológicas (precipitación



horizontal, otros) de las cabeceras de cuenca donde se encuentren los HAA. La metodología desarrollada en este estudio está dirigida para humedales ubicados en la bioregión Jalca.

Agradecimientos

Al Proyecto Cátedra CONCYTEC - UNMSM: “Teledetección en Desertificación y Sequía” por la subvención de una beca para el estudio de maestría. Al Proyecto PEER - UNMSM: “Strengthening resilience of Andean river-basin headwaters facing global change”, el cual busca generar metodologías para implementar un sistema de monitoreo de humedales altoandinos.

Referencias

- Ariza, A. (2013). **Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission) Versión 1.0**. Bogotá, Colombia: INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI.
- Baig, M. H., Lifu, Z., Tong, S., & Qingxi, T. (2014). Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. **Remote Sensing Letters**, 5(5), 423-431.
- Convención de Ramsar y Grupo de Contacto EHAA. (2008). **Estrategia Regional para la Conservación y Uso Sostenible de Humedales Altoandinos**. Ecuador: Gobiernos de Ecuador y Chile, CONDESAN y TNC-Chile.
- García, E., y Llellish, M. A. (2012). Cartografiado de bofedales usando imágenes de satélite Landsat en una cuenca altoandina del Perú. **Revista de Teledetección**, 38, 92-108.
- García, E., & Otto, M. (2015). Caracterización Ecohidrológica de Humedales Altoandinos usando imágenes de satélite multitemporales en la cabecera de cuenca del río Santa. **Ecología Aplicada**, 14(2), 115-125.
- Kauth, R.J. and Thomas, G.S. 1976, The Tasselled Cap—A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by LANDSAT. **LARS Symposia**, papel 159.
- MINAM. (2015). **Mapa nacional de cobertura vegetal: memoria descriptiva**. Lima: **Ministerio del Ambiente**, Dirección General de Evaluación, Valoración y Financiamiento del Patrimonio Natural.
- Ochoa-Tocachi, B. F., Buytaert, W., De Bièvre, B., Célleri, R., Crespo, P., Villacís, M., y otros. (2016). Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. **Hydrological Processes**, 1-16.
- Otto, M., Scherer, D., & Richters, J. (2011), Hydrological differentiation and spatial distribution of high altitude wetlands in a semi-arid Andean region derived from satellite data. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 15, 1713–1727.
- Tovar, C., Seijmonsbergen, A. C., & Duivenvoorden, J. F. (2013), Monitoring land use and land cover change in mountain regions: An example in the Jalca grasslands of the Peruvian Andes. **Landscape and Urban Planning**, 112, 40–49.