

## ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DEL ECOSISTEMA DE BOFEDALES DE LA CABECERA DE LAS CUENCAS PISCO Y PAMPAS (HUANCAVELICA) EMPLEANDO IMÁGENES TM Y OLI

### STUDY OF THE EVOLUTION OF THE BOFEDALES ECOSYSTEM AT THE HEADWATERS OF THE PISCO AND PAMPAS BASINS (HUANCAVELICA) USING TM AND OLI IMAGES

ADAUTO M. E. & WILLEMS B. L.

---

#### Resumen

Se presentan resultados preliminares del estudio de la evolución de ecosistemas de bofedales de la zona de Pilpichaca, Huancavelica. Estos bofedales, conjuntamente con los cuerpos de agua del lugar, forman parte del ecosistema en las cabeceras de las cuencas de Pisco y Pampas. Los estudios emplean como insumo principal imágenes de los sensores TM y OLI a bordo de los satélites Landsat, los que son procesados a fin de generar índices de vegetación y humedad —dos de los parámetros más relevantes a los ecosistemas de interés—. Asimismo, involucra la evaluación de técnicas de clasificación, tales como el análisis por árbol de decisión, como herramientas para la discriminación de áreas de humedales/no humedales, así como la identificación de los tipos de humedales existentes (permanentes y temporales). El proceso conduce hacia la generación de mapas temáticos, acerca de la ubicación y extensión de los tipos de humedales, así como la evolución multianual. Estos son validados mediante imágenes de alta resolución espacial y con estudios de análisis espectral. Los resultados arrojan una disminución permanente de las áreas de pastizales.

**Palabras claves:** Humedales altoandinos, clasificación de imágenes de satélites, OLI, TM.

#### Abstract

Preliminary results regarding the evolution of Andean wetlands of the Pilpichaca region, Huancavelica, are presented and discussed. Satellite images from sensors in the Landsat platforms (OLI, TM) are processed in order to obtain vegetation and humidity indices – two of the key parameters for studying wetland systems. Furthermore, several classification techniques, such as decision tree analysis, have been evaluated as tools for discriminating wetland/non-wetland areas, and for classifying different wetland types. Thematic maps about the location and extension of wetlands, as well as their changes between rain and drought seasons, and between different years, were obtained validated using high resolution images and spectral analysis. The results obtained show a clear reduction in the size of grasslands and wetlands of about 800 ha and 1,400 ha, respectively, during the period 2007-2008 and 2013-2014.

**Keywords:** High altitude Wetlands of the Andes, classification of satellite imagery, OLI, TM.

---

## Introducción

Los ecosistemas de humedales proveen una serie de servicios directos (provisión de agua y recursos de peces y plantas); e indirectos, derivados de sus funciones ambientales (retención de agua por inundaciones, carbono, sedimentos y nutrientes, recarga de acuíferos, reservorios de biodiversidad, estabilización de microclimas, medios de transporte, recreación y turismo)

(Acharya, 2000). Por su parte, los humedales altoandinos (páramos, bofedales y humedales de puna) almacenan el agua proveniente de las precipitaciones y lo liberan gradualmente cuenca abajo (Ramsar, 1971). Y con el fin de responder a las necesidades de la agricultura de la costa se han construido proyectos hídricos que han logrado incrementar las áreas aptas para el cultivo en la zonas bajas y ello se ha convertido en un punto de crítica importancia para los valles de la costa

desértica del Perú (albergan el 65% de la población que genera el 80% del PBI), en vista de que garantizan la provisión de agua fresca para el consumo humano de grandes centros poblados y actividades productivas, como la agricultura, minería y producción hidroeléctrica (Autoridad Nacional del Agua, 2011). Sin embargo, este tipo de obras de ingeniería han sido ejecutadas solo en función de las necesidades de la agricultura de la costa, pero no ha considerado la utilización del recurso para las actividades pecuarias de las comunidades altoandinas ni las necesidades de la población y de los productores agrícolas en su área de influencia, en la cuenca alta y media (Salazar, 2014).

CEPES (Huancavelica, 2009) menciona que el proyecto hidroenergético Choclococha fue construido a partir de la década de 1950 y colecta las aguas de la cuenca hidrográfica del río Pampas, que nace en el sistema de lagunas Choclococha, Orccocochoa, Ccaracocha y otras del norte de Huaytará y Castrovirreyna. Este sistema vertía sus aguas en forma natural hacia el Atlántico, mediante esta infraestructura que trasvasa los 492 millones de metros cúbicos (MMC) anuales y comprende su represamiento en la laguna de Choclococha, de la que se deriva un caudal aproximado de 15 m<sup>3</sup>/s hacia el fértil valle de Ica, que ha incrementado sus tierras aptas para el cultivo gracias a esta obra. Sin embargo, esa reserva hídrica solo beneficia a Ica y excluye a Huancavelica, marginando de su aprovechamiento a las comunidades campesinas, cuya actividad principal es la ganadería de camélidos sudamericanos (alpacas).

En este trabajo tendrá como objetivo la identificación, cuantificación, análisis de evolución multianual y mapeo de los bofedales (humedales altoandinos). El centro del área de estudio se encuentra localizado, aproximadamente, entre las coordenadas geográficas siguientes: (13°10'28"S; 75°8'22"W) (figura 1).

## Metodología

### Datos utilizados

Para el mapeo de los bofedales presentes en la zona se hará uso de la base de datos del satélite Landsat TM y OLI. Las imágenes son antes del inicio de la temporada de lluvias para el 2007 y 2013 y finales de temporada para los años 2008 y 2014. Se pueden descargar gratuitamente del portal de la USGS <<http://glovis.usgs.gov/>> de formato L1T; los meses seleccionados pueden extraerse de la base de datos del TRMM <<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/precipitation/tovas/>> para el área de estudio. Para su preprocesamiento se emplea el software ENVI 4.5, además de un modelo digital de elevación (DEM).

### Procesamiento digital de las imágenes TM y OLI

#### Calibración de las imágenes TM y OLI

Las imágenes de los sensores TM y OLI fueron convertidos a valores de radiancia usando las siguientes ecuaciones (Markhan y Barker, 1986):

$$ND = \left( \frac{ND_{max}}{L_{max} - L_{min}} \right) * (L - L_{min})$$

$$L = \left( \frac{L_{max} - L_{min}}{ND_{max}} \right) * ND + L_{min}$$

Donde L es la radiancia en W/m<sup>2</sup>.sr.µm, ND es el número digital para cada pixel de la imagen, L<sub>max</sub> y L<sub>min</sub> son las radiancias máxima y mínima (constantes de calibración), ND<sub>max</sub> es el número digital máximo de la imagen. Los valores de ganancia y compensación



Figura1. Ubicación del área de estudio.

son únicos para cada banda espectral adquirida para un sensor particular.

### Corrección geométrica y atmosférica

Las imágenes TM y OLI son de nivel L1T y vienen ortorectificadas. Para la corrección atmosférica de las imágenes se usó el módulo FLAASH que toma como base una ecuación estándar para la radiancia espectral en un pixel en el sensor,  $L$ , aplicado para el rango de longitud de onda solar, en materiales lambertianas o equivalentes (Matthew *et al.*, 2000). La ecuación es la siguiente:

$$L = \left( \frac{A\rho}{1 - \rho_e S} \right) + \left( \frac{B\rho_e}{1 - \rho_e S} \right) + L_a$$

Dónde  $\rho$  es la reflectancia superficial del pixel,  $\rho_e$  es la reflectancia superficial promedio del pixel y la región de entorno,  $S$  es el albedo esférico de la atmósfera,  $L_a$  es parte de la radiancia dispersada por la atmósfera,  $A$  y  $B$  son coeficientes que dependen de las condiciones atmosféricas y geométricas pero no depende de la superficie.

### Proceso de clasificación

El proceso de clasificación empleado es la clasificación por árbol de decisión, el cual tiene como ventaja principal su naturaleza no paramétrica y flexibilidad respecto de las relaciones no lineales de los datos de entrada, que pone en relieve un entrenamiento más rápido de interpretación sencilla y eficaz para automatizar la selección de características, reduciendo los datos de entrada en una nueva data (Friedl y Brodley, 1997). Para el cartografiado de nuestra zona se emplean como datos de entrada valores de SLOPE (rango de la pendiente obtenida del DEM), NDVI (índice de vegetación; Rouse *et al.*, 1973) y NDII (índice de infrarrojos; Hunt and Rock, 1989) —parámetros que caracterizan los ecosistemas de interés, permitiendo discriminar áreas de humedales y no humedales, así como sus subclases (permanentes y temporales).

En la etapa de evaluación de la fiabilidad de los resultados se usaron las imágenes de alta resolución disponibles para el área de estudio en el programa Google Earth.

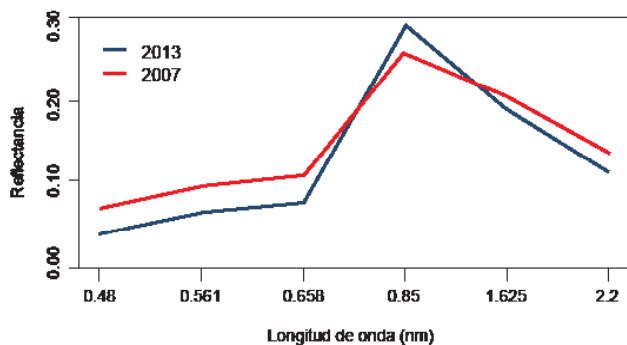


Figura 2. Reflectancia de la superficie de bofedal en función de la longitud de onda central.

Sobre estas imágenes se identificaron visualmente los bofedales que sirven como puntos de referencia a ser usados en la etapa de validación de los resultados.

## Resultados y discusión

### Comportamiento espectral de la superficie de los bofedales

El resultado de la clasificación permite identificar las áreas correspondientes a los bofedales permanentes (inundados y no inundados) y temporales (inundados y no inundados). Corroboramos el resultado con la firma espectral de la cobertura de los bofedales permanentemente inundados para ambas épocas (figuras 2 y 3).

En la región del visible (0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$ .), la reflectancia es más baja para la época húmeda debido a la mayor presencia de clorofila en la composición de las plantas.

Para la región del infrarrojo cercano (0,7 a 1,3  $\mu\text{m}$ .) se muestra un contraste entre las bandas del visible y la banda del infrarrojo cercano (los centros 0.658 y 0.85 rigen el parámetro de NDVI), con una pendiente más pronunciada en la época húmeda, dejando ver el mayor vigor de la vegetación para esta época.

La región del infrarrojo medio (1,3 a 3,0  $\mu\text{m}$ .) se muestra una mayor reflectividad para la época seca, debido al menor contenido de agua, en contraste con la época húmeda. Lo que va de acuerdo con la literatura internacional para la vegetación (Chuvieco, 2008). La diferencia de las bandas con centros 0.85 y 1.625 rigen el de NDII.

Se cuantifica el número de hectáreas correspondiente a los bofedales permanentes (inundados y no inundados) en las estaciones seca y húmeda, distinguidas por sus condiciones hidrológicas. Comparando las estaciones, en seis años, el número de hectáreas detectadas que corresponden a los años 2008 y 2014 se eleva (Figura 4).

### Cuantificación de los bofedales

Se cuantifica el número de hectáreas correspondiente a los bofedales permanentes (inundados y no inundados),

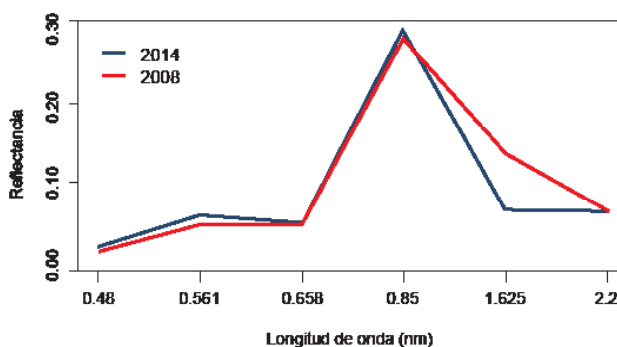


Figura 3. Reflectancia de la superficie de bofedal en función de la longitud de onda central.

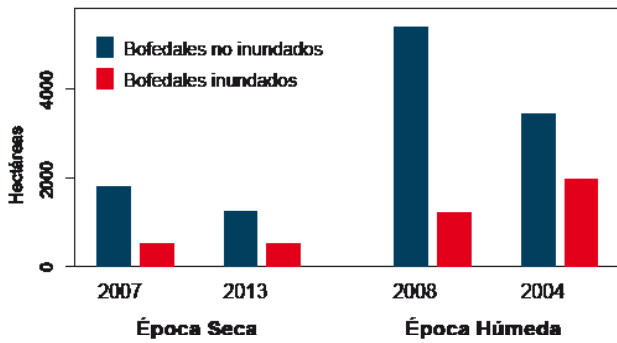


Figura 4. Extensión de bofedales inundados y no inundados permanentes.

que se mantienen o cambian su subclase (inundado y no inundado) en cada periodo. Comparando en seis años el número de hectáreas bofedales que permanecen como no inundados, disminuye en casi 800 ha (Figura 5). Recordemos que los bofedales son ecosistemas dinámicos.

Analizando pixeles que correspondan al bofedal no inundado (considerados pastizales) con una probabilidad 0.5, se muestra que cerca de 150 ha corresponden a los bofedales no inundados que no son detectados (en ningún subtipo ni subclase) para los años 2013 y 2014 (Figura 6).

### Mapeo de los bofedales

La figura 7 muestra la comparación visual de los resultados de la clasificación por árbol de decisión, NDVI, NDII;

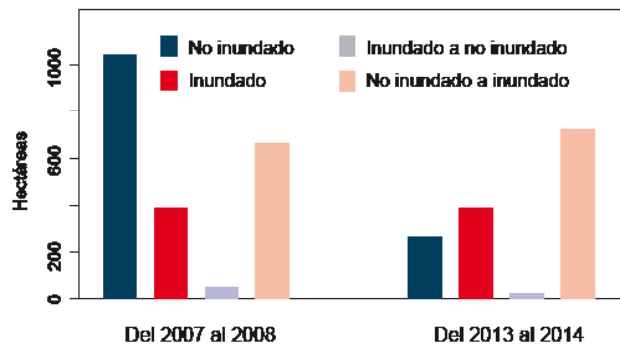


Figura 5. Extensión de bofedales permanentes que cambian o mantienen su estado.

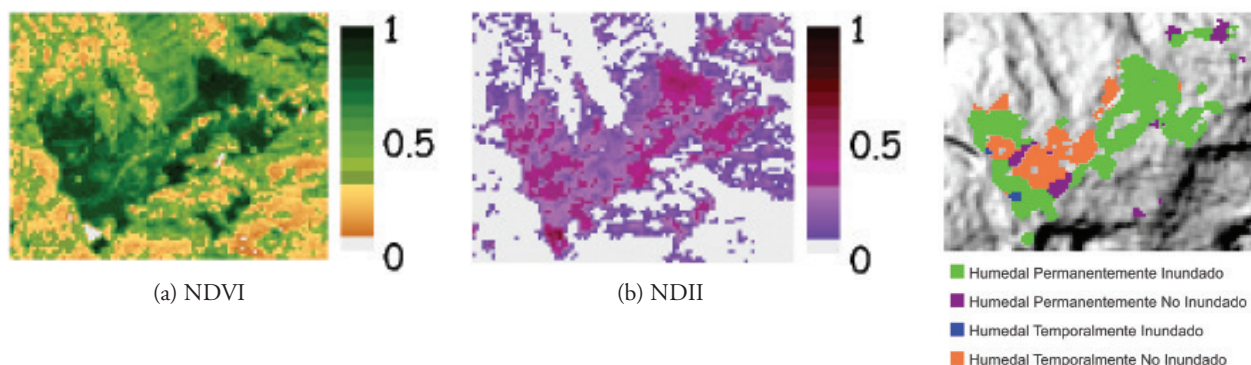


Figura 7. Comparación visual.

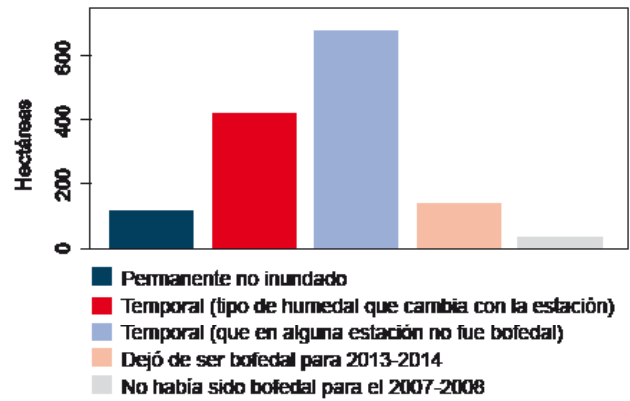


Figura 6. Extensión de bofedales permanentes no inundados que cambian o mantienen su estado.

para una de las zonas afectadas dentro del área de estudio.

### Alcance del trabajo

El estudio realizado explora metodologías para seguir la evolución de ecosistemas de humedales en zonas altoandinas, las que son fundamentales para las actividades productivas de las poblaciones albergadas en la zona (por ejemplo, ganadería y agricultura). En ese sentido, el trabajo que se viene desarrollando tiene el potencial de proveer una herramienta de bajo costo y eficiente, que contribuya a las tareas de gestión sostenible de ecosistemas por parte de los diferentes actores existentes (población, organizaciones sociales, entidades gubernamentales). En concreto, ofrece la posibilidad de establecer las áreas que vienen siendo afectadas, cómo se propagan y, a su vez, monitorear acciones de mitigación, entre otras.

### Conclusiones

La presente metodología cumplió con el objetivo de clasificar los subtipos de bofedales y sus subclases con el uso de imágenes de satélite, así como su cuantificación, la que deja una clara muestra de la disminución de ecosistemas



de bofedales en la zona. El NDVI y el NDII son parámetros físicos que están muy relacionados en el comportamiento de estas superficies, como muestra su respuesta espectral. Para un mejor estudio se deben documentar las áreas correspondientes a los bofedales y otras coberturas propias de la zona, con coordenadas GPS y fotografías dentro de la región de estudio, con el fin de poder digitalizarlos como regiones de interés y así obtener resultados más óptimos, y dar paso al análisis de la dinámica hídrica de los bofedales.

## Agradecimientos

A USAID-funded PEER program, proyecto “Strengthening resilience of Andean river basin headwaters facing global change”-UNMSM, el cual busca generar metodologías y resultados del estudio de las cabeceras de cuenca hidrográfica en los Andes peruanos. Este trabajo se viene desarrollando en el Laboratorio de Teledetección, FCF-UNMSM.

## Referencias

ACHARYA, G. (2000). Approaches to Valuing the Hidden Hydrological Services of Wetland Ecosystems. *Ecological Economics*, 35:63-74.

AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA. (2011). *Plan Estratégico Institucional*.

CENTRO PERUANO DE ESTUDIOS SOCIALES, HUANCAVELICA. (2009). *Conflicto Por Recurso Hídrico Entre la Comunidad Campesina de Carhuancho y el Proyecto Especial Tambo Ccaraccocha*.

CHUVIECO, E. (2008). *Teledetección ambiental la observación de la tierra desde el espacio*. España: Ariel, S. A.

FRIEDL, M. A., BRODLEY, C. E. (1997). Decision Tree Classification of Land Cover From Remotely Sensed Data. *Remote Sensing Of Environment*, 61(3):399-409.

HUNT, E. R., JR. y ROCK, B. N. (1989). Detection of Changes in Leaf Water Content Using Near - And Middle - Infrared Reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 30:43-54.

MARKHAN, B. y BARKER, J. (1986). Landsat MSS and TM post-calibration dynamics range, exoatmospheric reflectance and at satellite temperature. EOSAT. *Landsat Technical Notes*. pp. 3-8.

MATTHEW, M. W., S. M. ADLER-GOLDEN, A. BERK, S. C. RICHTSMIEIER, R. Y. LEVINE, L. S. BERNSTEIN, P. K. ACHARYA, G. ANDERSON, G. W. FELDE, M. P. HOKE, A. RATKOWSKI, H.-H. BURKE, R. D. KAISER y D. P. MILLER. (2000). Status of Atmospheric Correction Using a MODTRAN4-based Algorithm, *SPIE Proceeding, Algorithms for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery VI*, 4049:199-207.

ROUSE, J. W., HASS, R. H., SCHELL, J. A., y DEERING, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of the 3rd Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*. 309-317.

SALAZAR, BEATRIZ (2014), Proyectos de agua para Ica: vulneran el derecho de las comunidades de Huancavelica. *La Revista Agraria*, 161:4-5.