

Caso práctico

Cartografiado de bofedales usando imágenes de satélite Landsat en una cuenca altoandina del Perú

E. García¹ y M. A. Lleellish²

¹ *Autoridad Nacional del Agua. Calle Diecisiete, n.º 35. Urb. El Palomar, San Isidro. Lima, Perú.*

² *Dirección General Forestal y Fauna Silvestre del Ministerio de Agricultura, Calle Diecisiete, n.º 35. Urb. El Palomar, San Isidro. Lima, Perú.*

Resumen

En este trabajo se presenta una metodología basada en imágenes de satélite Landsat para cartografiar los humedales altoandinos conocidos como bofedales en la cuenca altoandina del río Acarí. Se utilizaron dos imágenes del satélite Landsat ETM+ cercanas al final de la estación húmeda y seca para captar la variabilidad espacial y temporal de estos ecosistemas y definir la mejor época para su cartografiado. La metodología aplicada se basó en el algoritmo de clasificación conocido como Análisis Lineal de Mezclas Espectrales (ALME), apoyado de la interpretación visual y la inclusión del modelo digital de elevación SRTM. Los resultados fueron evaluados usando imágenes de satélite de alta resolución espacial, a través de matrices de contingencia. El algoritmo ALME fue capaz cartografiar los bofedales mayores de 0.8 ha, con una fiabilidad del productor entre 86.9 y 91.2 %, según la fecha de la imagen utilizada, aunque esto último no fue estadísticamente significativo ($p = 0.95$). La fiabilidad del usuario fue en todos los casos del 100%. La fiabilidad global estuvo entre 89.8 y 93.2% y el índice Kappa entre 75 y 82%. El uso de esta metodología permitió conocer que en esta cuenca altoandina existen 2828 ha de bofedales estimadas para el año 2000, que equivalen al 1.5% del área de la cuenca alta y al 0.6% del área de toda la cuenca.

Palabras clave: teledetección, cartografiado, ALME, humedales, bofedales, Landsat.

Abstract

Mapping bofedales using Landsat satellite images in a Peruvian highandean basin

This paper describes a Landsat satellite imagery based method to map high Andean wetlands known as bofedales in the Acarí highandean river basin. Two Landsat scenes were used which are near to the wet and dry season to capture the spatial and temporal variability of these ecosystems, so the best season for their mapping were identified. The method was based on the algorithm of classification known as Lineal Spectral Mixture Analysis (LSMA), in conjunction with visual interpretation and a digital elevation model SRTM. The results were evaluated with satellite images of high resolution using contingency matrix. LSMA algorithm was able to map bofedales higher than 0.8 ha, with producer's accuracy between 86.9 and 91.2%, according to the date used, although this later not was significant ($p=0.95$). User's accuracy in all cases was of 100%. The overall accuracy was between 89.8 and 93.2% and the kappa coefficient was between 75 and 82%. The use of this methodology made possible determine that in the Acarí high river basin there are 2828 ha of bofedales for the 2000 year, which is equivalent to 1.5% of the high basin and to 0.6% of the entire basin.

Key words: remote sensing, mapping, LSMA, wetlands, bofedales, Landsat.

* Autor para la correspondencia: egarciag@ana.gob.pe

Recibido: 27-08-12 ; Aceptado: 12-09-12.

Introducción

Los humedales están entre los ecosistemas más productivos del mundo y son de inmensa importancia social y económica para la humanidad (Hall, 1997), cumplen muchas funciones relacionada con los recursos hídricos, como ser fuentes naturales de agua, reguladores del ciclo hidrológico y el clima, zonas de descarga y recarga de acuíferos, barreras naturales contra las inundaciones y la intrusión marina, mejorar la calidad del agua (Shine y Klemm, 1999). Además se encuentran protegido por el tratado internacional conocido como la Convención Ramsar (1971).

En el Perú, existen humedales en las regiones marino-costera, andina y amazónica. Un tipo particular de estos humedales son los bofedales, conocidos también como oconales, turberas, entre otros; que se ubican en las zonas altoandinas y altiplánicas del país. Los bofedales son hábitats naturales húmedos, con agua permanente, alimentados de diferentes fuentes como manantiales, agua de deshielo, ríos y lluvia (Alzérrea, *et al.*, 2001). A la fecha, en el Perú no existe un inventario nacional de humedales, sino trabajos hechos por diversas instituciones públicas y privadas, de manera aislada, a distintas escalas cartográficas y de escaso alcance territorial (limitándose a algunas regiones en particular). Por esta razón fue necesaria la elaboración de una metodología de trabajo que permita cartografiar de manera rápida y eficiente la superficie de bofedales como paso previo a un inventario de los mismos. La metodología se sustenta en el uso de técnicas modernas como la teledetección. Según la Convención de Ramsar (2007), las imágenes de satélite proveen de una herramienta única para el cartografiado de humedales en grandes extensiones de terreno, con el fin de obtener información sobre su ubicación y extensión, a distintas escalas de análisis. Un repaso de estas aplicaciones se puede encontrar en Ozesmi & Bauer (2002). Actualmente, el algoritmo de clasificación conocido como Análisis Lineal de Mezclas Espectrales (ALME) o en inglés *Spectral Mixture Analysis (SMA)*, es una alternativa a los métodos convencionales de clasificación digital de imágenes de satélite. Algunos autores han destacado la utilidad

de este algoritmo para el cartografiado de humedales (Brivio & Zilioli, 1996; Sang & Chong, 2004; He *et al.*, 2010; Michishita *et al.*, 2012).

El propósito de este trabajo fue evaluar el uso de las imágenes de satélite Landsat y el algoritmo ALME para cartografiar los bofedales ubicados en la cuenca alta del río Acarí, evaluando sus resultados mediante matrices de contingencias. Además, se ha incluido un análisis estadístico para determinar si la fecha de toma de las imágenes influye en la identificación de este tipo de humedales.

Área de estudio

El área de estudio es la cuenca alta del río Acarí, que pertenece a la vertiente hidrográfica del Pacífico y abarca una superficie de 179.097 ha. Geográficamente se ubica entre los 76° 01' y 75° 30' de Longitud Oeste, y 14° 53' y 13° 49' de Latitud Sur (Figura 1). Políticamente forma parte de la provincia de Lucanas, departamento de Ayacucho. Altitudinalmente la cuenca alta está comprendida entre los 3.700 y 4.786 msnm.

De acuerdo a la información meteorológica del estudio del INRENA (2003a), en la parte alta de la cuenca, a una altitud de 4.800 msnm, el promedio de precipitación anual es de 680 mm y es de carácter estacional. Las lluvias tienen sus inicios en los meses primaverales y van cobrando mayor intensidad (mes de febrero), para luego decrecer casi bruscamente durante el mes de abril, en que se inicia un periodo de estiaje. La temperatura está ligada en sus variaciones al factor altitudinal. En la parte alta de la cuenca la temperatura es de tipo frígido (5° C aproximadamente). En el citado estudio se menciona la falta de estaciones y registros históricos en esta parte de la cuenca.

En otro estudio realizado en la microcuenca del río San José (INRENA, 2003b), afluente de la parte alta del río Acarí, se hace una descripción de la cobertura vegetal de esta microcuenca, en base a una combinación de conceptos fisonómicos, climáticos y florísticos. En dicho estudio los bofedales son considerados como un tipo de asociación vegetal y se les describe como áreas hidromórficas que

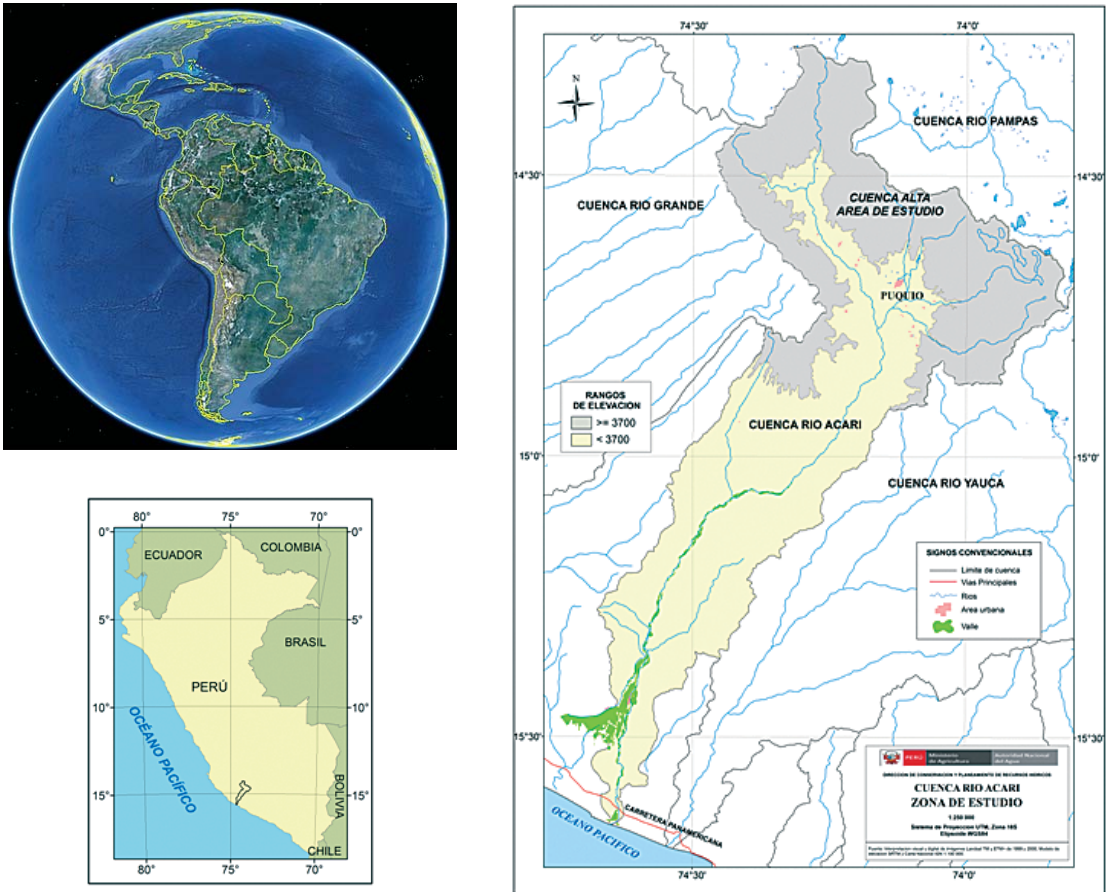


Figura 1. Mapa de ubicación de la cuenca del río Acari y del área de estudio.

se encuentran por encima de los 3.700 msnm. Igualmente, se menciona que la especie que tipifica a esta asociación es la juncaceae (*Seudogramínea*) *Distichia muscoides*, de porte almohadillado (menos de 10 cm de altura). Esta especie está en permanente crecimiento, debido a la abundante humedad del terreno y al mismo tiempo es la principal fuente alimenticia del ganado altoandino, principalmente ovino y camélidos. Su consumo es tan intenso que está provocando su deterioro.

Otras asociaciones vegetales citadas en el mismo estudio (INRENA, 2003b), y que se encuentran por encima de los 3.700 msnm, son la vegetación de tipo herbazal como el pajonal y césped de puna, donde es común encontrar algunas especies arbustivas siempre verdes a manera de inclusiones en estas pasturas como por ejemplo la «tola» *Parastrephyta lepidophylla* y en las quebradas algunos ejemplares de especies arbóreas como la «queñoa» *Polylepis* sp.

Este tipo de vegetación es usado en forma extensiva para el pastoreo del ganado como alpacas, llamas, ovinos y vacunos durante el año. Otra asociación vegetal viene a ser el matorral húmedo, que se caracteriza por la presencia de comunidades arbustivas que mantienen su follaje siempre verde durante el año (perennifolias), y presentan una morfología especializada que le permite contrarrestar las condiciones extremas del clima. Generalmente las matas arbustivas alcanzan una altura máxima promedio de 2.5 m y se encuentran mayormente dispersas y en forma restringida, formando pequeños «manchales» en ciertos sitios de las laderas de los cerros; también es común que estos arbustos invadan terrenos de cultivos abandonados y en descanso.

También existen áreas de cultivo ubicadas principalmente a lo largo de las laderas. Los principales cultivos desarrollados son: papa, maíz amiláceo, haba, trigo, achita o kiwicha,

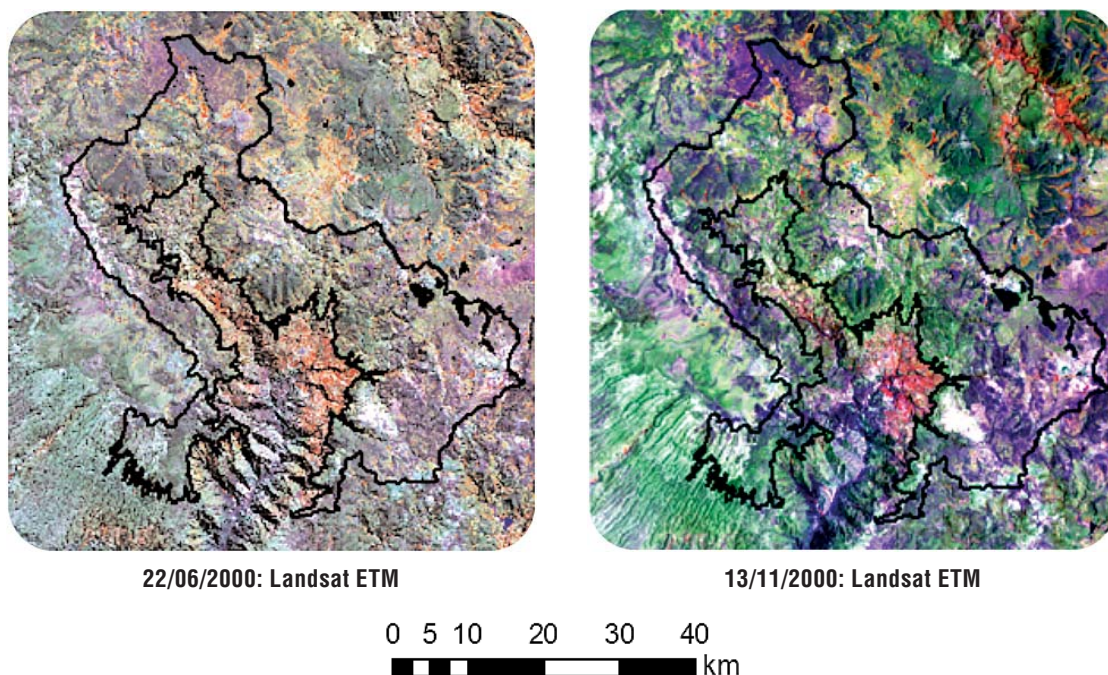


Figura 2. Imágenes de satélite Landsat usadas, en combinación 453 (RGB) y superpuesto con el límite de la cuenca alta del río Acari.

cebada grano y alfalfa. Se hace mención que existe la necesidad de trabajos de un mayor detalle para un completo inventario de las áreas de cultivos agrícolas y de pastos (INRENA, 2003b).

Materiales y método

Descripción de la información satelital y cartográfica

Se utilizaron dos escenas del satélite Landsat ETM+, (path/row: 5/70) del 22 de junio y 13 de noviembre de 2000 (Figura 2). Las imágenes fueron descargadas de manera gratuita desde internet, a través de la interfaz de datos de las ciencias de la Tierra (Earth Science Data Interface ESDI) de la Universidad de Maryland. El satélite Landsat ETM+ (NASA, 1998), orbita la tierra a una altitud de 705 km y provee imágenes de manera continua y del mismo lugar cada 16 días, cubriendo una extensión de 185 km × 185 km. Este satélite cuenta con siete bandas multiespectrales, tres en el rango del visible, una en el infrarrojo cercano, una en el

infrarrojo medio y una en infrarrojo lejano. La resolución espacial es de 30 m a excepción de la banda térmica que es de 60 m. Adicionalmente posee una banda pancromática de 15 m de resolución espacial.

Como información auxiliar se usó la Carta Nacional del Instituto Geográfico Nacional (IGN) a la escala 1:100 000, que se encontraba en formato *shapefile* de ESRI. Esta información de tipo vectorial contenía datos de curvas de nivel, red hidrográfica, lagos y lagunas, cotas, señales geodésicas y áreas urbanas. También, se usó el modelo digital de elevación (MDE) gratuito, denominado SRTM por sus siglas en inglés *Shuttle Radar Topography Mission*, que cuenta con una resolución espacial de 90 m para Sudamérica y un detalle y precisión aceptables para una cartografía a la escala 1:100 000 (Alves *et al.*, 2006).

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. Sobre estas imágenes se identificaron visualmente los bofedales que servirían como puntos verdad-terreno a ser usados en la etapa de validación de los resultados. Igualmente, en la etapa de evalua-

ción de la fiabilidad de los resultados, se utilizó la información digital en formato vectorial *shapefile* del mapa de cobertura vegetal elaborado por el INRENA (2003b) para la zonificación agroecológica de la microcuenca San José a la escala 1:25 000. Este mapa incluía a la clase temática bofedales y fue elaborado en base a la interpretación visual de una imagen Landsat ETM+ fusionada a 15 m de píxel, correspondiente al 08/08/1999. Esta información será comparada con los resultados de la clasificación digital usando el algoritmo ALME y los puntos de referencia colectados de las imágenes de alta resolución del programa Google Earth.

Descripción del algoritmo ALME

El ALME se fundamenta en que la respuesta espectral medida por el sensor, es una combinación lineal de las respuestas espectrales de todos los componentes dentro de un determinado píxel (Smith *et al.*, 1990; Adam *et al.*, 1995, Ustin *et al.*, 1999). Está dado por la siguiente ecuación:

$$\rho_{i,j,k} = \sum_{m=1,p} F_{i,j,m} \rho_{m,k} + e_{i,j,k} \quad [1]$$

donde $\rho_{i,j,k}$ indica la reflectividad observada en el píxel i, j en la banda k ; $F_{i,j,m}$ es la proporción del componente m en ese píxel para cada una de las p categorías puras; $\rho_{m,k}$ corresponde a la reflectividad característica de ese componente m en la banda k , y $e_{i,j,k}$ es un término del error asociado a la estimación de las proporciones en cada píxel i, j .

El ALME primero necesita definir un conjunto de píxeles puros de las cubiertas que serán clasificadas y que se conocen como «endemembers» (Adam *et al.*, 1995) y en castellano como «miembros terminales» (Chuvieco, 1996). El número de miembros terminales está limitado por el número de bandas de la imagen de satélite donde será aplicado (Theseira *et al.*, 2002). Para el caso de las imágenes Landsat, un máximo de cuatro miembros terminales son usualmente usados, debido a que las tres bandas del espectro visible están fuertemente correlacionadas unas con otras

(Small, 2001; Theseira *et al.*, 2002). Estos miembros terminales pueden ser identificados principalmente mediante dos métodos (Lunetta, 1998; van der Meer, 1999): (a) librerías espectrales obtenidas en campo o en laboratorio y (b) la extracción de los píxeles puros directamente desde la imagen. El segundo método es preferido al primero, ya que son colectados bajo las mismas condiciones atmosféricas de la imagen. Esto ahorra la necesidad de una corrección atmosférica absoluta para su aplicación (Palaniswami, 2006). En este trabajo se usó la opción (b), ya que se extrajo la muestra de píxeles puros directamente desde la imagen, a través de la digitalización en pantalla.

Definición de la escala cartográfica y la mínima unidad cartografiada

Según la Convención Ramsar (2007), la escala espacial utilizada para el inventario de humedales es inseparable de sus objetivos y tiene una gran influencia en la selección del método a utilizar. También recomienda, que al escoger la escala de trabajo es preciso determinar primero el objetivo y luego evaluar cómo puede lograrse mediante la escala escogida.

Dado que el propósito de este trabajo es cartografiar y cuantificar los bofedales que existen en la cuenca alta del río Acarí, a un nivel de semidetalle, para su uso con fines de gestión y conservación de humedales. Se determinó que las imágenes de satélite Landsat serían adecuadas para este fin y se definió la escala de trabajo en 1:100 000.

La información que actualmente existe sobre bofedales a nivel nacional en el Perú, ha sido tomada de los mapas de cobertura vegetal elaborados a la escala 1:250 000 por el INRENA (Figura 4), la cual es importante para conocer el potencial de humedales a escala nacional, pero no es lo suficientemente detallada para la gestión y conservación de estos ecosistemas a escala de cuenca.

La Mínima Unidad Cartografiada (MUC) fue definida en 0.8 ha. La MUC representa el tamaño mínimo de una categoría que puede ser cartografiado como una entidad individual y está en estrecha relación con la resolución de la imagen de satélite (Lunetta & Balogh, 1999,

Cobbing, 2007). En este trabajo se consideró la regla propuesta por Thompson *et al.* (2002), quien propone que para la clasificación digital, un mínimo de tres por tres píxeles son necesarios en la determinación de una categoría a cartografiar. En el caso de las imágenes Landsat con un píxel de 30 m, correspondería un área de 8.100 m², que en hectáreas equivalen a 0.8 ha.

Preprocesamiento de la información

Las imágenes Landsat ETM+ ya se encontraban ortorectificadas en el sistema de proyección UTM (Universal Transversa Mercator) Zona 18 Sur, por lo que se verificó que exista una adecuada coincidencia con la red hidrográfica de la Carta Nacional del IGN a la escala 1:100 000 usada como referencia en este trabajo. Luego se efectuaron sobre las escenas unos realces radiométricos, con el fin de hacer una primera interpretación visual de la escena y de los bofedales existentes. Los realces radiométricos usados fueron de ecualización de histograma y desviación estándar. En base a este análisis se seleccionó la combinación de bandas que discriminaría mejor las cubiertas presentes en las imágenes, en especial de los bofedales. Se escogió la combinación 453 asignada a los colores rojo, verde y azul (RVA), y que corresponden a las bandas del infrarrojo cercano (0.77-0.9 μm), medio (1.5-1.7 μm) y visible (0.63-0.69 μm) del satélite Landsat ETM. En general, esta combinación demostró que captura una gran variabilidad de tonos en la imagen, y además ha sido utilizada en la interpretación de las cubiertas del terreno en el programa de la Agencia Europea del Medio Ambiente denominado CORINE (*Coordination of Information on the Environment*) Land Cover (EEA, 1994).

Otro proceso necesario fue la conversión de niveles digitales (ND) a valores de reflectividad. Para esto se usó el método COS(TZ), el cual incluye una corrección por el efecto de dispersión y transmisividad atmosférica (Chávez, 1996). La conversión de ND a valores de reflectividad intenta disminuir la variabilidad espectral ocasionada por diversos factores externos como la atmósfera y la iluminación so-

lar para imágenes captadas en diferentes fechas (Chávez, 1996). Estas operaciones de preprocesamiento fueron realizadas de la misma manera en la escena del mes de abril y noviembre de 2000. Los programas utilizados en esta parte del trabajo fueron el ArcGis y ERDAS.

Cartografiado digital de bofedales

En este trabajo se ha considerado la existencia de Bofedales a partir de la cota de 3.700 msnm. Este dato se tomó del estudio del INRENA (2003b) y fue corroborado con la interpretación visual de las imágenes, y con apoyo del MDE. El flujo de trabajo seguido se muestra en la **Figura 3**. La aplicación del algoritmo ALME se realizó independientemente para cada imagen Landsat ETM, usando el módulo «Linear Spectral Unmixing» del programa IDRISI. Las tres bandas utilizadas del Landsat ETM fueron la 3, 4 y 5, y los tres «endmembers» fueron: bofedales, agua y suelo; que se digitalizaron en pantalla sobre la imagen (**Figura 4-a**). Tras aplicar el algoritmo ALME, los resultados fueron tres mapas de fracción o abundancia (**Figura 4-b, c y d**), que muestran en valores en el rango de 0-1 la probabilidad de que un píxel pertenezca a cada una de estas cubiertas (bofedales, agua y suelo). Igualmente se obtuvo una imagen de error (**Figura 4-e**) que representa el grado de ajuste del modelo. Dado que el interés es determinar la extensión de los bofedales, se trabajó en adelante con el mapa de fracción de esta cubierta (**Figura 4-b**).

En la **Figura 4** se pueden ver los mapas de fracción de las cubiertas obtenidas con el ALME para la imagen Landsat ETM de junio. El valor más alto representa la mayor probabilidad de encontrar este tipo de cubierta. Sobre el mapa de fracción de bofedales se aplicó un umbral de separabilidad a fin de obtener un mapa binario que represente en valores de «1» la mayor probabilidad de encontrar bofedales y en «0» la no existencia bofedales. Este umbral se determinó analizando el mapa de fracción de bofedales superpuesto con la imagen de satélite original mediante un proceso de prueba y error. El valor final del valor de umbral para aislar los bofedales, fue fijado en 0.5.

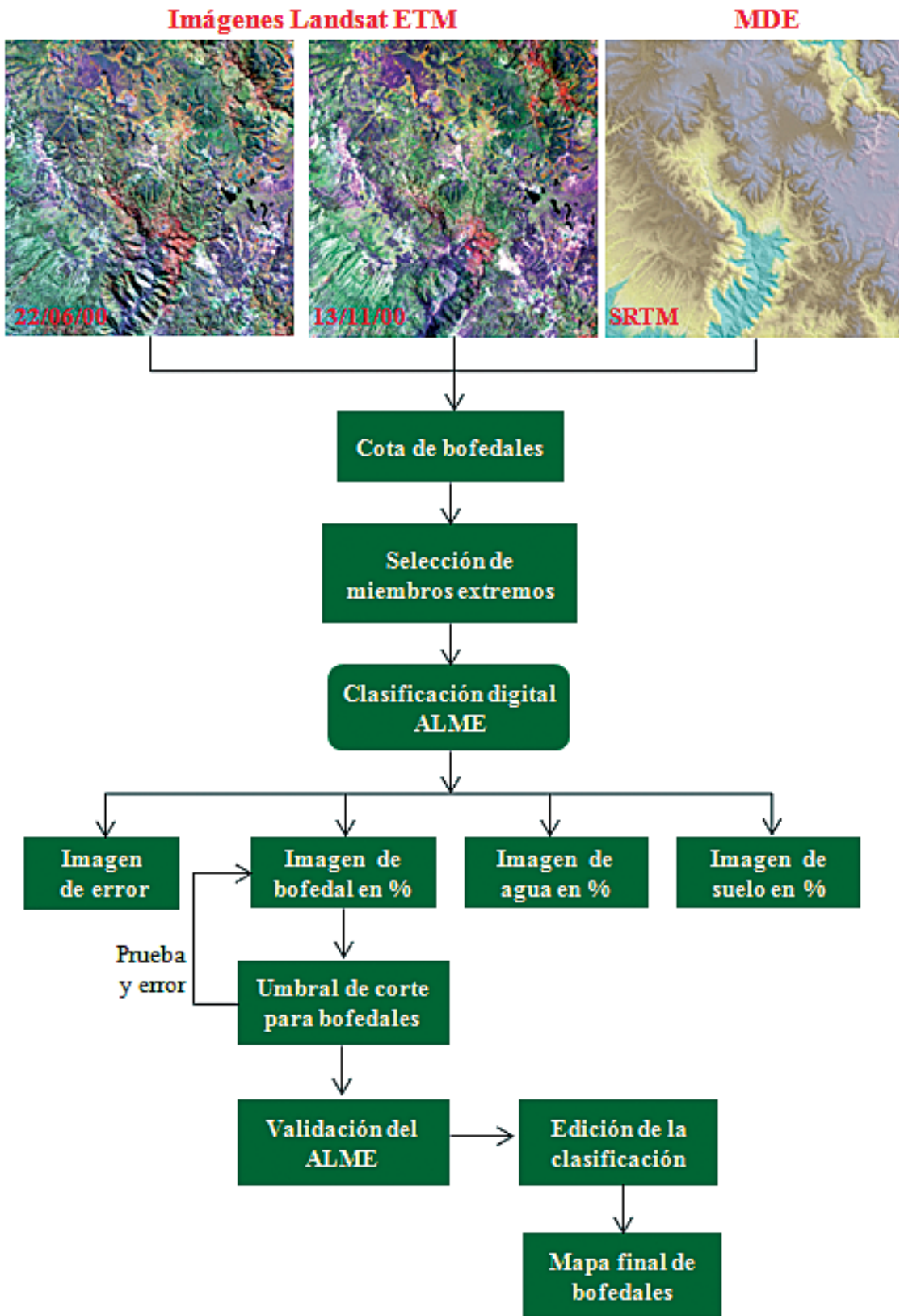


Figura 3. Flujo de trabajo seguido para extraer los bofedales de la cuenca alta del río Acarí usando el algoritmo ALME sobre imágenes Landsat.

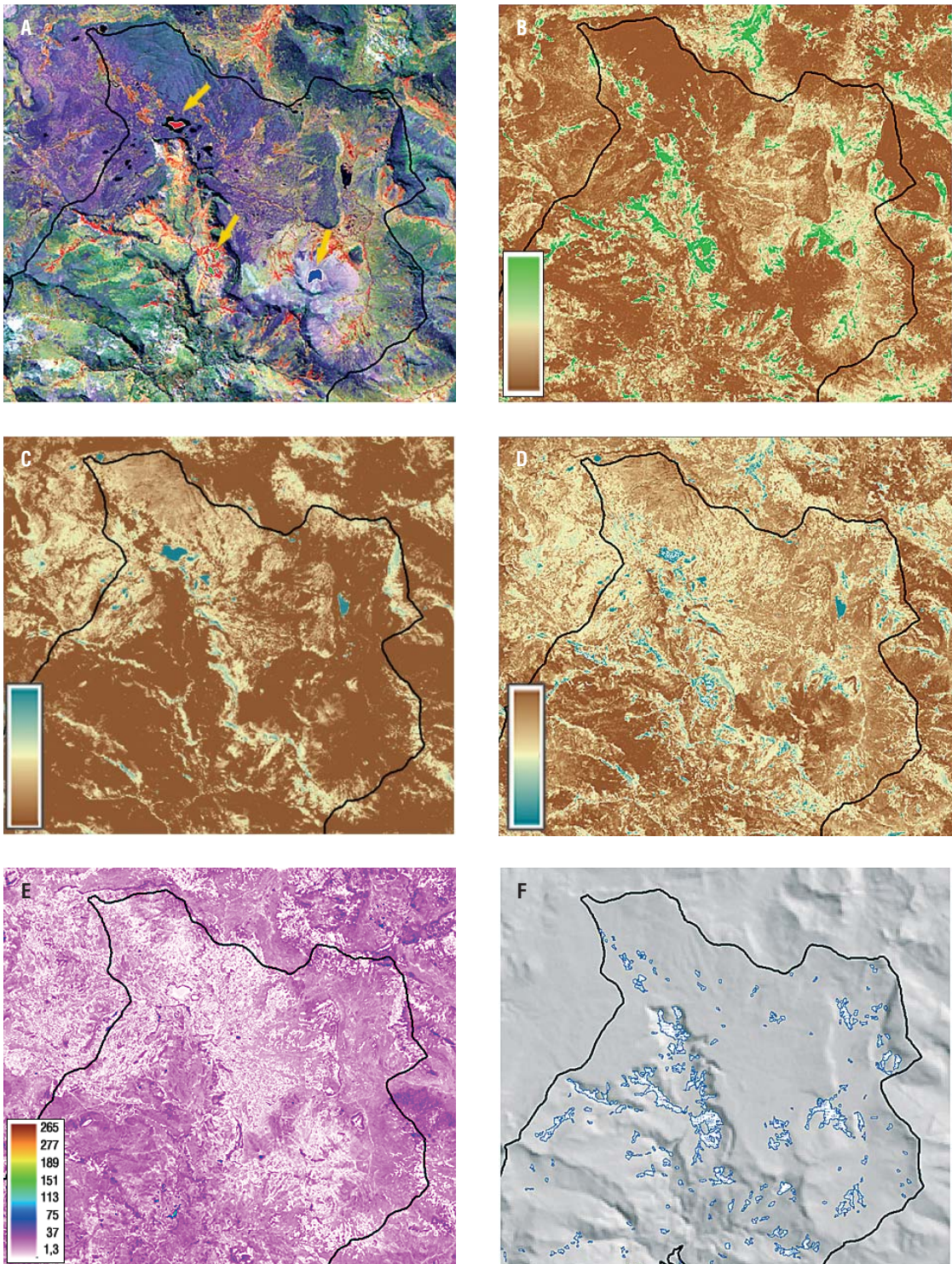


Figura 4. a) Imagen Landsat con la ubicación de los píxeles puros. b) Imagen fracción de bofedales. c) imagen fracción de agua. d) imagen fracción de suelo. e) imagen de error y f) bofedales clasificados

De la misma forma se procedió con la imagen de noviembre, seleccionando los «endmembers» en la misma ubicación que en la imagen

de junio, esto a efectos de comparar sus resultados y evaluar la mejor fecha para la identificación de los bofedales. En este trabajo se

optó al final por sumar las clasificaciones de bofedales de las dos fechas utilizadas (junio y noviembre), aunque como se discutirá más adelante esto no fue significativo estadísticamente.

Sobre las imágenes de fracción de bofedales de junio y noviembre, se aplicaron dos tipos de filtrados. Por un lado, uno para suavizar los píxeles de borde evitando el efecto escaleras de la clasificación digital y por el otro para disminuir el ruido inherente a la clasificación digital, eliminando las agrupaciones de píxeles que no están por encima de la MUC seleccionada (0.8 ha). Igualmente, se hicieron algunas correcciones manuales donde ambos filtros fallaban, especialmente por la confusión entre los bofedales y los cultivos de ladera que existen en las cotas más bajas de la cuenca alta por su similar reflectividad espectral.

El mapa de bofedales en formato raster se importó dentro del programa Arcgis para convertirlo al formato vectorial *shapefile* de tipo polígono (Figura 4-f), ya que este tipo de información es de uso más frecuente en los SIG.

Evaluación de la clasificación digital

Es necesario, luego del proceso de clasificación en imágenes de satélite, reflejar de alguna manera la fiabilidad de sus resultados. Para esto, se puede comparar un conjunto de puntos escogidos aleatoriamente en el mapa clasificado con otras fuentes que se consideren fiables (Sobrino, 2000).

La evaluación de la fiabilidad de los mapas de bofedales obtenidos para la parte alta de la cuenca del río Acarí usando el algoritmo ALME, se hará usando matrices de contingencias con sus respectivos descriptores estadísticos, como la fiabilidad global (F) y el análisis Kappa, definido este último por el valor del estadístico KHAT (Tabla 1). Una matriz de contingencia es una tabla cuadrada que indica la correspondencia entre las clases del producto a evaluar y las clases de referencia. La diagonal principal indica el número de píxeles que han sido correctamente clasificados para cada categoría, mientras que los elementos ubicados fuera de la diagonal indican los errores de

Tabla 1. Expresión matemática de la matriz de contingencia y de sus estadísticos F y KHAT

		j = Columnas (referencia)			Total de filas
		1	2	k	n ⁱ⁺
i = Filas (clasificación)	1	n ₁₁	n ₁₂	n _{1k}	n ₁₊
	2	n ₂₁	n ₂₂	n _{2k}	n ₂₊
	k	n _{k1}	n _{k2}	n _{kk}	n _{k+}
Total de columnas	n ^{-j}	n ₊₁	n ₊₂	n _{+k}	n

$$F = \frac{\sum_{i=1,k} x n_{ii}}{n} \quad KHAT = \frac{n \sum_{i=1,k} n_{ii} - \sum_{i=1,k} n_{i+} n_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1,k} n_{i+} n_{+i}}$$

Fuente: adaptado de Congalton & Green, 2007.

asignación. La matriz de contingencia también permite evaluar el error y la fiabilidad con respecto a las perspectivas del productor y del usuario del mapa. La fiabilidad del productor, es una medida del error de omisión, mientras que la fiabilidad del usuario, es una medida del error de comisión (Congalton, 1991). El valor de F, se calcula dividiendo el número total de píxeles correctamente clasificados por el número total de píxeles de referencia y expresándolo como porcentaje, mientras que el valor de KHAT es un estadístico que mide la diferencia entre el acuerdo mapa-realidad que cabría esperar simplemente por azar, más detalle en Congalton & Green, 2007.

Congalton *et al.* (1983) describe de qué manera un test de significancia estadística puede ser aplicado sobre el KHAT de una sola clasificación para determinar si el acuerdo entre la clasificación por sensores remotos y la información de referencia es estadísticamente significativa (mejor que una clasificación al azar). Igualmente, describe otro test aplicado sobre un par de KHAT calculados independientemente, con el que es posible comparar estadísticamente dos tipos de clasificaciones o dos fechas de imágenes para evaluar cual produce resultados más fiables.

En este trabajo, los datos para alimentar la matriz de contingencia se obtendrán de las imágenes de satélite de alta resolución del programa Google Earth disponibles para un sector de la parte alta de la cuenca de río Acarí. En base a estas imágenes y usando la interpretación vi-

sual se extraerán de manera aleatoria los puntos que representarán la verdad-terreno que servirán para la validar la clasificación digital usando el algoritmo ALME. La misma información también será usada para evaluar la fiabilidad del mapa de bofedales que se encuentra en el estudio del INRENA (2003b) de la microcuenca San José y que ha sido elaborado por métodos analógicos.

Resultados y discusión

Los mapas clasificados con el algoritmo ALME fueron evaluados a través de cuatro matrices de contingencia (Tablas 2-5) que se calcularon en base a 177 puntos extraídos de manera aleatoria de las imágenes de alta resolución del programa Google Earth. De los 177 puntos, 137 puntos corresponden a bofedales, y el resto a otro tipo de cubierta del suelo.

Las cuatro matrices de contingencias calculadas, obedecían a criterios y métodos de clasificación distintos, estos fueron: i) en base a los bofedales cartografiados por el ALME en la imagen del mes de junio versus la información puntual extraída de las imágenes de alta resolución (Tabla 2). ii) en base a los bofedales cartografiados por el ALME en la imagen del mes de noviembre versus la información puntual extraídas de las imágenes de alta resolución (Tabla 3). iii) en base a los bofedales cartografiados por el método ALME luego de efectuar la integración de las clasificaciones

Tabla 2. Matriz de contingencia para la clasificación de la imagen de junio (i)

		Datos de referencia				
		Bofedal	No Bofedal	Total	Ex.U.	E.C.
Datos clasificados	Bofedal	121	0	121	100.0	0.0
	No Bofedal	16	40	56	71.4	28.6
	Total	137	40	177		
	Ex.P.	88.3	100.0		F = 91.0	
	Ex.O.	11.7	0.0		KHAT = 0.77	

Tabla 3. Matriz de contingencia para la clasificación de la imagen de noviembre (ii)

		Datos de referencia				
		Bofedal	No Bofedal	Total	Ex.U.	E.C.
Datos clasificados	Bofedal	119	0	119	100.0	0.0
	No Bofedal	18	40	58	69.0	31.0
	Total	137	40	177		
	Ex.P.	86.9	100.0		F = 89.8	
	Ex.O.	13.1	0.0		KHAT = 0.75	

de las imágenes de junio y noviembre versus la información puntual extraídas de las imágenes de alta resolución (Tabla 4). iv) en base a los bofedales cartografiados por el método ALME luego de efectuar la integración de las clasificaciones de las imágenes de junio y noviembre versus la información extraídas por método analógicos de interpretación y delimitación manual en imágenes impresas y con comprobación de campo (Tabla 5).

Del análisis de las matrices se desprende la siguiente información: en la matriz (i), de los 137 puntos de referencia para la cubierta de bofedales, fueron identificados correctamente por el ALME en el mes de junio 121 puntos, lo que hace una fiabilidad del productor del 88.3% y un error de omisión de 11.7%. En

el caso de la fiabilidad del usuario esta es del 100% por lo que el error de comisión es nulo. La fiabilidad global (F) es de 91% y el valor de KHAT es de 0.77, lo que quiere decir que nuestra clasificación es mejor en 77% que una clasificación hecha al azar. En la matriz (ii), de los 137 puntos de referencia para la cubierta de bofedales, fueron identificados correctamente por el ALME en el mes de noviembre 119 puntos, lo que hace una fiabilidad del productor del 86.9%, algo menor que para la imagen de junio, y un error de omisión de 13.1%, algo mayor que en el mes de junio. En el caso de la fiabilidad del usuario esta es del 100% por lo que el error de comisión es nulo. La fiabilidad global (F) es de 89.9% y el valor de KHAT es de 0.75, lo que quiere decir que nues-

Tabla 4. Matriz de contingencia para la suma de clasificaciones de las imágenes de junio y noviembre (iii)

		Datos de referencia				
		Bofedal	No Bofedal	Total	Ex.U.	E.C.
Datos clasificados	Bofedal	125	0	125	100.0	0.0
	No Bofedal	12	40	52	76.9	23.1
	Total	137	40	177		
	Ex.P.	91.2	100.0		F = 93.22	
	Ex.O.	8.8	0.0		KHAT = 0.82	

Tabla 5. Matriz de contingencia para la delimitación manual (iv)

		Datos de referencia				
		Bofedal	No Bofedal	Total	Ex.U.	E.C.
Datos clasificados	Bofedal	112	0	113	99.1	0.9
	No Bofedal	25	39	64	60.9	39.1
	Total	137	40	177		
	Ex.P.	81.82	97.5		F = 85.3	
	Ex.O.	18.2	2.5		KHAT = 0.65	

tra clasificación es mejor en 75% que una clasificación hecha al azar. En la matriz (iii), de los 137 puntos de referencia para la cubierta de bofedales, fueron identificados correctamente en la integración de la imagen clasificada por el ALME en los meses de junio y noviembre 125 puntos, lo que hace una fiabilidad del productor del 91.2%, ligeramente mayor a la clasificación independiente del mes de junio y mayor que en la clasificación independiente del mes de noviembre. El error de omisión fue de 8.8%, ligeramente menor que en la clasificación independiente del mes de junio y menor que en la clasificación independiente del mes de noviembre. En el caso de la fiabilidad del usuario esta fue del 100%, por lo que el error de comisión es nulo, igual que los casos anteriores (clasificación independiente de junio y noviembre). La fiabilidad global (F) fue de 93.2% y el valor de KHAT es de 0.82, lo que quiere decir que nuestra clasificación es mejor en 82% que una clasificación hecha al azar. Por último, en la matriz (iv), de los 137 puntos de referencia para la cubierta de bofedales, fueron identificados correctamente en el mapa elaborado por métodos convencionales (INRENA, 2003^b), 112 puntos, lo que hace una fiabilidad del productor del 81.8%, la más baja en relación a las matrices anteriores. El error de omisión también fue mayor, 18.2%, en relación a las matrices anteriores. En el caso de la fiabilidad del usuario esta fue del 85.3%, con un error de comisión de 18.2%. La fiabilidad global (F) fue de 85.3% y el valor

de KHAT es de 0.65, lo que quiere decir que nuestra clasificación es mejor en 65% que una clasificación hecha al azar.

La mayor cantidad de aciertos del ALME en la clasificación de bofedales se obtiene con la clasificación que integra las imágenes de junio y noviembre (91.2%), seguida de la clasificación independiente de la imagen de junio (88.3%), seguida de la de noviembre (86.9%) y por último la clasificación obtenida por los métodos analógicos de interpretación y digitalización manual (81.8%). El análisis estadístico de las matrices de contingencia permitió evaluar independientemente y en pares el nivel de significancia estadística, sobre cada criterio de clasificación aplicado para extraer los bofedales de las imágenes de satélite Landsat.

En la **Tabla 6** se presenta los resultados del análisis Kappa sobre las matrices de contingencia individuales. Como se mencionó, el valor del estadístico KHAT es una medida de la fiabilidad muy usada para evaluar los resultados alcanzados en una clasificación digital de imágenes de satélite frente una fuente de información de mayor fiabilidad. Landis y Koch (1977) caracterizaron en tres los rangos en que se puede encontrar el valor de este estadístico KHAT: un valor mayor que 0.80 (>80%) representa un acuerdo muy fuerte; un valor entre 0.40 y 0.80 (40-80%) representa un acuerdo moderado; y un valor menor de 0.40 (40%) representa un acuerdo muy pobre. En la **Tabla 6** también se muestran el valor del estadístico Z usado para determinar si la clasificación es sig-

Tabla 6. Comparación de la significancia estadística individual para las cuatro clasificaciones

Matriz de contingencia	KHAT	Estadístico Z	Resultado
i	0.77	14.56	S
ii	0.75	13.61	S
iii	0.82	17.07	S
iv	0.65	10.60	S

S = Significativo ($p = 0.95$).

Tabla 7. Comparación de la significancia estadística entre fechas y método de clasificación

Matriz de contingencia	Estadístico Z	Resultado
i vs. ii	0.26	NS
iii vs. i	0.69	NS
iii vs. ii	0.95	NS
iii vs. iv	2.17	S

NS = No significativo, S = Significativo ($p = 0.95$).

nificativamente mejor que una clasificación realizada al azar. Al nivel de 95% de confianza, el valor crítico de Z sería 1.96. En las cuatro clasificaciones conseguimos un valor del estadístico Z mayor que el valor crítico 1.96 ($p = 0.95$), por lo que se puede afirmar que en las cuatro clasificaciones conseguimos resultados mejores que los esperados en una clasificación hecha al azar.

En la **Tabla 7**, se presentan los resultados del análisis Kappa al comparar en pares las matrices de contingencia de las tablas 2-5 para determinar si son estadísticamente significativas. El resultado de este test de significancia revela que solo para las matrices de contingencia «iii vs. iv», esta diferencia es significativa, ya que el valor del estadístico Z es mayor que el umbral de significancia escogido 1.96 ($p = 0.95$). De lo anterior, se puede afirmar que en el caso de este trabajo, el método de clasificación digital ALME obtiene una mayor fiabilidad en el cartografiado de bofedales que los métodos analógicos de interpretación y digitalización manual. Además, en lo que respecta al uso de imágenes de distintas fechas para el cartografiado de bofedales, este trabajo reveló que la clasificación de imágenes de distintas fechas o la suma de ambas clasificaciones no es estadísticamente sig-

nificativa, ya que en cada caso el valor del estadístico Z fue menor que el umbral de significancia escogido 1.96 ($p = 0.95$). Aunque con la suma de ambas clasificaciones se consiguen un mayor valor de KHAT.

Luego, en el programa ArcGis, se calculó la extensión de la superficie de bofedales para la parte alta de la cuenca del río Acarí se. Existe en total 2.828 ha de bofedales para el año 2000, que equivalen al 1.5% del área de la cuenca alta del río Acarí y al 0.6% del área de toda la cuenca. El mapa final con la distribución y extensión de los bofedales de la cuenca alta del río Acarí se muestra en la **Figura 5**.

Algunos inconvenientes en el uso de esta metodología son la determinación del valor altitudinal adecuado para considerar la existencia de bofedales, el cual puede variar en función de la cuenca estudiada y está sujeto a la habilidad y conocimiento del intérprete. Se puede notar que mientras que la cota de bofedales sea más baja, los bofedales tenderán a confundirse con zonas cultivadas de la cuenca, ya que presentan similar reflectividad; por lo que los trabajos de edición final serán mayores. En el caso específico de la cuenca alta del río Acarí, el valor de 3.700 msnm fue el más adecuado, no obstante existió alguna confusión entre los bofedales cartografiados con los cul-

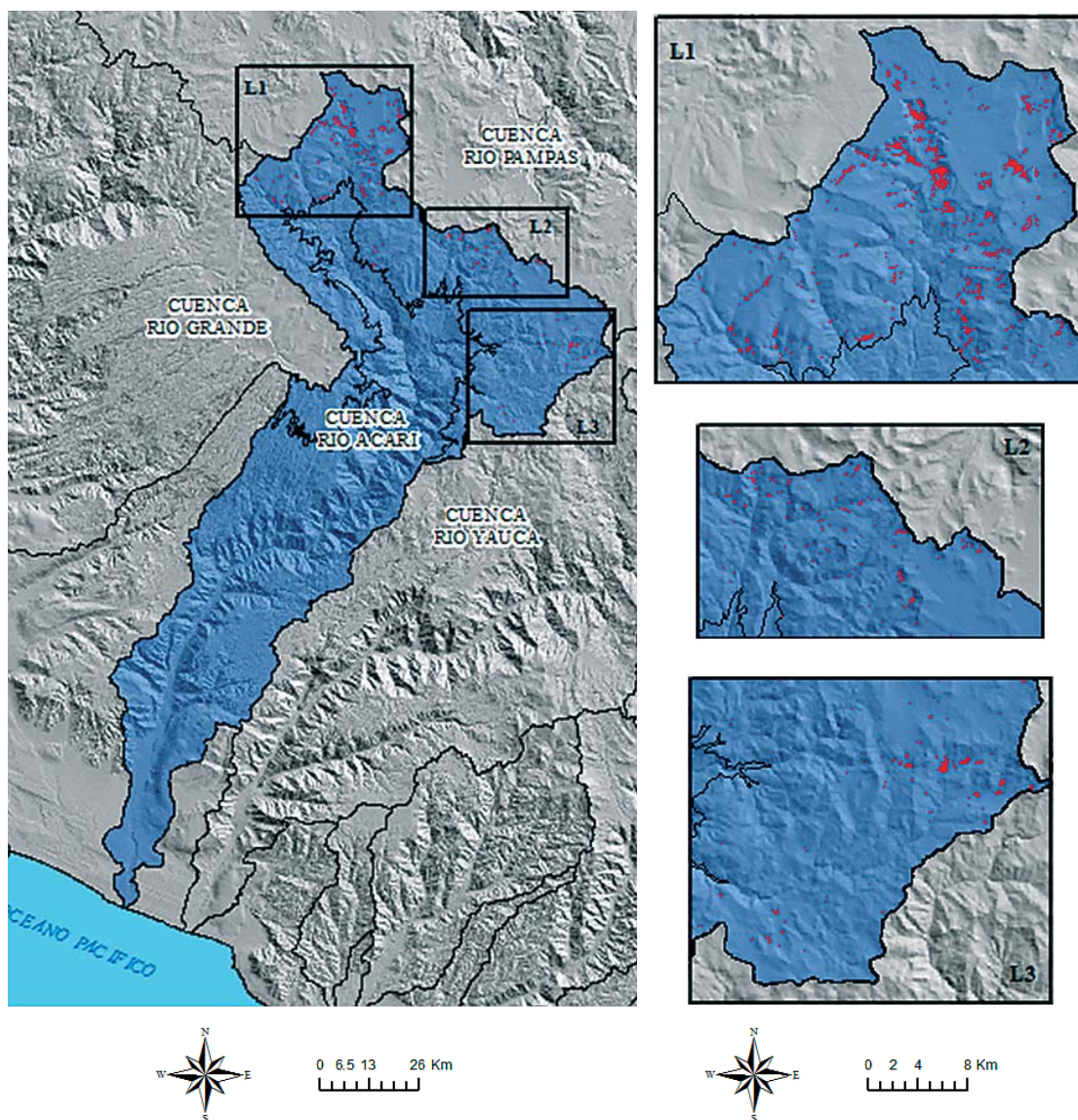


Figura 5. Mapa de bofedales para la cuenca alta del río Acarí extraídos en base a las imágenes Landsat aplicando el algoritmo ALME.

tivos ubicados en zonas de laderas en el límite de la cotas 3.700 msnm, lo que tuvo que editarse de manera manual. Esta metodología es eficiente para cartografiar los humedales altoandinos conocidos como bofedales, que muestran una vegetación permanentemente húmeda todo el año, pero se pudo notar que existen otro tipo de ecosistemas hídricos que no pueden ser representados adecuadamente, ya que si son susceptibles a la temporada húmeda y seca en la parte alta de la cuenca.

En el proceso de clasificación de bofedales, se pudo notar que si el interés es cartografiar

cuerpos de agua (lagos, lagunas), las imágenes de satélite cercanas al final de la estación húmeda, capturarán una mayor extensión de lagunas permanentes y temporales, ya que en la época seca las lagunas más grandes tienden a disminuir su espejo de agua y las lagunas de menor tamaño tienden a secarse.

Si hacemos una comparación de la cartografía a la escala 1:250 000, que actualmente existe en el Perú sobre bofedales a nivel nacional (Figura 6), inmediatamente nos damos cuenta de la generalización y sobrestimación de este tipo de humedales. De aquí la impor-



Figura 6. Bofedales extraídos de la imagen de satélite Landsat (en azul) Vs. La información actual de bofedales a nivel nacional a la escala 1:250 000 (en amarillo).

tancia de contar con información más detallada de la superficie de humedales del país que permita cuantificar con mayor fiabilidad la extensión de este tipo de ecosistema.

Conclusiones

Este artículo demuestra que las imágenes de satélite Landsat y el algoritmo ALME pueden ser usadas de manera efectiva para cartografiar los humedales altoandinos conocidos como bofedales, a la escala 1: 100 000 y mayores de 0.8 ha.

La fiabilidad del productor para la cubierta de bofedales en la cuenca alta del río Acarí estuvo entre 86.9-91.2% y la fiabilidad del usuario fue del 100%. La fiabilidad global de la clasificación estuvo entre 89.8-93.2%. La superficie de bofedales estimada para el año 2000 fue de 2.828 ha, que representa el 1.5% de la superficie de la cuenca alta y 0.5% de la superficie de toda la cuenca.

El empleo de imágenes de distintas fechas en un año, permitió evaluar la mejor época para cartografiar los bofedales de la cuenca alta del río Acarí. Los resultados concluyeron que a un nivel de significancia estadística del 95%, es indistinto el uso de imágenes de diferentes

fechas en esta cuenca, aunque la mayor cantidad de aciertos se da cuando se suman las clasificaciones de ambas imágenes, seguida de la clasificación de la imagen de finales de la estación húmeda, y luego de la imagen de finales estación seca.

La comparación entre los bofedales cartografiados manualmente, a través de métodos analógicos y los bofedales clasificados digitalmente con el algoritmo ALME; demostró que este último es superior para el cartografiado de bofedales. La clasificación digital permitió identificar una mayor extensión y nivel de detalle a diferencia de la clasificación manual.

La principal dificultad para cartografiar los bofedales con el algoritmo ALME está en seleccionar un adecuado umbral en el mapa de fracción de bofedales. Además mientras la cota límite de bofedales es más baja, estos pueden confundirse con algunos cultivos de ladera, por su similar respuesta espectral; por lo que se debe hacer una edición manual al final del proceso de clasificación digital.

El uso de imágenes de alta resolución disponibles en el programa Google Earth de manera gratuita, es una fuente de información muy útil para evaluar la fiabilidad de la clasificación digital cuando no se cuentan con información de campo, como quedó demostrado en este trabajo.

El cartografiado de bofedales realizado a través de imágenes de satélite provee de valiosa información para la gestión y conservación de estos humedales altoandinos, a fin de mantener las funciones y servicios ecosistémico en las cabeceras de cuenca, sobre todo aquellos relacionados con la regulación y la provisión de recursos hídricos.

Referencias

- ADAMS, J. B., SABOL, D. E., KAPOV, V., FILHO, R. A., ROBERTS, D. A., SMITH, M. O., *et al.* 1995. Classification of multispectral images based on fractions of endmembers: Application to land-cover change in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing of Environment*, 52(2): 137-154.
- ALVES, P. R., GABOARDI, C. & CASTRO, L. 2006. Avaliação da precisão dos modelos SRTM para a Amazônia. *Revista Brasileira de Cartografia*, 58(1): 101-107.

- ALZÉRRECA, H. A., PRIETO, G. C., LAURA, J. C., LUNA, D. CH., & LAGUNA, S. B. 2001. Características y distribución de los bofedales en el ámbito boliviano del sistema T.D.P.S. Proyecto BOL/98/G31, Conservación de la Biodiversidad en la Cuenca del Lago Titicaca —Desagüadero— Poopó-Salar de Coipasa (T.D.P.S.), Subcontrato 21.12. Asociación Integral de Ganaderos en Camélicos de los Andes (AIGACAA), La Paz, Bolivia, 140 pp.
- BRIVIO, P. A., & ZILIOI, E. 1996. Assessing wetland changes in the Venice lagoon by means of satellite remote sensing data. *Journal of Coastal Conservation*, 2: 23-32.
- COBBING, B.L. 2007. The use of Landsat ETM imagery as a suitable data capture source for alien acacia species for the WFW programme. Master thesis, Rhodes University.
- CONGALTON, R. G., & GREEN, K. 2007. Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices. Lewis Publishers, New York.
- CONGALTON, R. G. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37:35-46.
- CONGALTON, R. G., ODERWALD, R. G., & MEAD, R. A. 1983. Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate statistical techniques. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49(12): 1671-1678.
- CONVENCIÓN DE RAMSAR. 2007. Inventario de humedales: un Marco para el Inventario de Humedales. Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales 3a. edición, vol. 12. Secretaría de la Convención Ramsar, Gland (Suiza).
- CHAVEZ, P. S. 1996. Image-Based Atmospheric Corrections-Revisited and Improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62: 1025-1036.
- CHUVIECO. 1996. *Fundamentos de la Teledetección espacial*, Madrid: Ed. Rialp, 568 p.
- EEA. 1994. CORINE Land Cover: Part 1: Methodology; CORINE Land Cover; Commission of the European Communities: Copenhagen, Denmark.
- HALLS, A. J. 1997. Wetlands, Biodiversity and the Ramsar Convention: The Role of the Convention on Wetlands in the Conservation and Wise Use of Biodiversity. Ramsar Convention Bureau, Gland, Switzerland.
- HE, M. M., ZHAO, B., OUYANG, Z., YAN, Y., & LI, B. (2010). Linear spectral mixture analysis of Landsat TM data for monitoring invasive exotic plants in estuarine wetlands. *International Journal of Remote Sensing*, 31 (16): 4319-4333.
- INRENA. 2003a. Estudio Integral de los Recursos Hídricos en las Cuencas de los Ríos Acari y Yauca. Componente: Estudio de Inventario de Fuentes de Agua Superficiales. Ministerio de Agricultura, INRENA, PP. 138. Lima, Peru.
- INRENA. 2003b. Zonificación agroecológica Microcuenca San Jose - Cuenca Acari Semidetalle. Ministerio de Agricultura, INRENA, pp. 117. Lima, Perú
- LUNETTA, R. S. 1998. Applications, project formulation, and analytical approach. In *Remote Sensing Change Detection: Environmental Monitoring Methods and Applications*; Ann Arbor Press: Chelsea, MI, USA, Chapter 1, pp. 1-19
- LUNETTA, R. S., & BALOGH, M. E. 1999. Application of Multi-Temporal Landsat 5 TM Imagery for Wetland Identification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65: 1303-1310.
- LANDIS J. R., & KOCH, G. G. 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33:159-174.
- MICHISHITA, R., GONG, P., XU, B. (2012). Spectral mixture analysis for bi-sensor wetland mapping using Landsat TM and Terra MODIS data. *International Journal of Remote Sensing*, 33 (11): 3373-3401.
- NASA. 1998. Landsat 7 Science Data Users Handbook. Landsat Project Science Office at NASA's Goddard Space Flight Center. http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html.
- OZESMI, S. L., & BAUER, M. E. 2002. Satellite remote sensing of wetlands. *Wetland Ecology and Management*, 10(5): 381-402.
- PALANISWAMI, C., UPADHYAY, A. K., & MAHESWARAPPA, H. P. 2006. Spectral mixture analysis for subpixel classification of coconut. *Current Science*, 91(12): 1706-1711.
- SANG, K., & CHONG, P. 2004. Linear spectral mixture analysis of Landsat imagery for wetland land-cover classification in Paldang reservoir and vicinity, Korean. *Journal of Remote Sensing*, 20 (3) 197-205.
- SHINE, C., & DE KLEMM, C. 1999. Wetlands, Water and the Law: Using law to advance wetland conservation and wise use. IUCN, Gland, Switzerland, Cambridge, UK and Bonn, Germany. pp. xvi + 330.
- SMALL, C. 2001. Estimation of urban vegetation abundance by spectral mixture analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 22: 1305-1334.
- SMITH, M. O., USTIN, S. L., ADAMS, J. B., & GILLESPIE, A. R. 1990. Vegetation in deserts: regional measure of abundance from multispectral images. *Remote Sensing of Environment*, 1098(31): 1-26.
- SOBRINO, J. A., RAISSOUNI, N., KERR, Y., OLIOSO, A., LÓPEZ-GARCÍA, M. J., BELAID, A., *et al.* 2000. Teledetección. Sobrino, J. A. (Ed), Servicio de publicaciones, Universidad de Valencia, España.
- THESEIRA, M. A., THOMAS, G., & SANNIER, C. A. D. 2002. An evaluation of spectral mixture modeling applied to a semi-arid environment.

- International Journal of Remote Sensing, 23: 687-700.
- THOMPSON, M., MARNEWECK, G., BELL, S., KOTZE, D., MULLER, J., COX, D., *et al.* 2002. A methodology for a south African National Wetland Inventory. Department of Environmental Affairs and Tourism Report.
- USTIN, S. L., SMITH, M. O., JAQUEMOUD, S., VERSTRAETE, M., & GOVAERTS, Y. 1999. Geobotany: vegetation mapping for Earth Science. Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing, 3d ed, pp.189-233. New York, USA.
- VAN DER MEER, F. 1999. Can we map swelling clays with remote sensing? International Journal of Earth Observation. 1(1): 27-35.