

Caracterización y modelamiento espacial de patrones en humedales alto andinos, Perú, mediante algoritmos, periodo 1985-2016

Jhonathan Aponte Saravia*

Jesús Efrén Ospina**

Elena Posada***

Recibido el 28 de abril de 2017; aceptado el 06 de julio de 2017

Abstract

The presence of waterlogged soils and evergreen vegetation, is the fundamental characteristics of the high Andean wetlands, which water supply sources are the rainfall, glaciers and underground waters, this ecosystems complies with determinant functions for the live beings that inhabit these extreme zones. In this study, the objective was to characterize these wetlands, determine surface areas and evaluate behavior patterns of the runoff magnitude by the Topographic Climate Index (TCI) model in inter-decade periods. The identification of the wetlands was obtained as from the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) derived from the images LANDSAT and through the ICT from the digital raising model ALOS Palsar. Likewise, to determine behavior patterns of the surface areas of wetlands in different time periods the images of NDVI and TCI were used. It was concluded that the combination of the technical cites, improve the identification process of spatial distribution of wetlands. Additionally supposedly, there is a direct relation between the behavior of the surface areas of wetlands and the surface area of the runoff magnitude in time.

Key words: *High Mountain Peat, Remote Sensing, Topographic Climate Index, Multi-temporary Evaluation, Spatial Analysis, Normalized Vegetation Index.*

Resumo

A presença de solos alagados e vegetação sempre verde é a característica fundamental das zonas úmidas alto-andinas, cujas fontes de fornecimento de água são as precipi-

* Candidato a maestría en Geomática, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Colombia, correo electrónico: japontes@unal.edu.co

** Profesor, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Colombia.

*** Profesora, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Colombia, correo electrónico: eposada@igac.gob.co

tações, as geleiras e as águas subterrâneas; este ecossistema tem funções determinantes para os seres vivos que moram nestas zonas extremas. Neste estudo, o objetivo foi caracterizar estas zonas úmidas, determinar as áreas superficiais e avaliar os padrões de comportamento da intensidade de escorrência mediante o modelo de Índice Clima Topográfico (ICT) em períodos de interdécadas. A identificação das zonas úmidas foi obtida a partir do Índice Diferença Normalizado de Vegetação (NDVI) derivado das imagens LANDSAT e através do ICT procedente do modelo de elevação digital ALOS Palsar. Igualmente, para determinar os padrões de comportamento das áreas superficiais das zonas úmidas, em diferentes períodos de tempo, foram utilizadas as imagens de NDVI e ICT. Chegou-se à conclusão que a combinação das mencionadas técnicas melhoram o processo de identificação de distribuição espacial de zonas úmidas. Além disso, presume-se que existe uma relação direta entre o comportamento das áreas superficiais das zonas úmidas e a área superficial da intensidade de escorrência no tempo.

Palavras-chave: *Pauis de alta montanha, sensores remotos, Índice Clima Topográfico, avaliação multitemporária, análise espacial, Índice Normalizado de Vegetação.*

Resumen

La presencia de suelos anegados y vegetación siempre verde, es la característica fundamental de los humedales alto andinos, cuyas fuentes de suministro de agua son las precipitaciones, los glaciares y las aguas subterráneas, este ecosistema cumple funciones determinantes para los seres vivos que habitan en estas zonas extremas. En este estudio el objetivo fue caracterizar estos humedales, determinar las áreas superficiales y evaluar los patrones de comportamiento de la magnitud de escorrentía mediante el modelo de Índice Clima Topográfico (ICT) en periodos de interdécadas. La identificación de los humedales se obtuvo a partir del Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) derivado de las imágenes LANDSAT y a través del ICT procedente del modelo de elevación digital ALOS Palsar. Así mismo, para determinar los patrones de comportamiento de las áreas superficiales de los humedales en diferentes periodos de tiempo se utilizaron las imágenes de NDVI y ICT. Se concluyó que la combinación de las citadas técnicas, mejoran el proceso de identificación de distribución espacial de humedales. Igualmente, se presume que existe una relación directa entre el comportamiento de las áreas superficiales de los humedales y el área superficial de la magnitud de escurrimiento en el tiempo.

Palabras claves: *Turberas de Alta Montaña, Sensores Remotos, Índice Clima Topográfico, Evaluación Multitemporal, Análisis Espacial, Índice Normalizado de Vegetación.*

Introducción

Los humedales tienen un rol importante en la dinámica hidrológica, cultural, socio-económica en las cuencas alto andinas de la región de América Latina y global (Michishita, Jiang, Gong y Xu, 2012, COP9 DOC.26, 2005). Son los medios más productivos del mundo, albergan diversidad biológica, concentran especies de aves, mamíferos, reptiles, anfibios, peces e invertebrados, son depósitos de material genético vegetal, fuentes de agua dulce y productividad (COP9 DOC.26, 2005; Ramsar Irán, 2006). Se conocen también como bofedales o turberas, ecosistemas frágiles cuyas funciones son fundamentales (García y Otto, 2015), desempeñando un papel crítico en el mantenimiento de la diversidad única de la biota rara y endémica de la cordillera de los Andes (Villagrán y Castro, 1997).

Los humedales alto andinos se encuentran sobre los 3,800 msnm, esta altitud es variable dependiendo del sector en que se ubiquen (García y Otto, 2015). Son ecosistemas muy vulnerables al cambio climático, siendo especialmente sensibles a la ocurrencia de fenómenos extremos (Farinha *et al.*, 1996; Ramsar Irán, 2006), por ejemplo, la sequía, puede afectar la función y la distribución de los humedales (IPCC, 2012), siendo un factor determinante de carácter ecológico superior, que influye en su vulnerabilidad y se manifiesta en variaciones de precipitación y temperatura en ciclos diarios, anuales o multianuales, que determinan a su vez los procesos biofísicos y socio ecológicos de estos ecosistemas (Vidal, Delgado y Andrade, 2013). Los factores que causan la vulnerabilidad de estos ecosistemas son: su ubicación en relación con las zonas climáticas, régimen hidrológico, balance hídrico y la capacidad de regulación de la cuenca, la estabilidad de formaciones superficiales, la erodabilidad, la complejidad de la red hídrica superficial, el régimen de humedad del suelo y subsidencia, la cobertura y los atributos funcionales de vegetación terrestre y de flora acuática en Los Andes (Vidal *et al.*, 2013).

Durante el siglo XX, gran parte de los humedales alto andinos se degradaron y se desconocen los cambios y usos de cobertura generados en estos ecosistemas (Jones *et al.*, 2009), sin embargo (Kohler y Maselli, 2012; Zeballos, Soruco, Cusicanqui, Joffre y Rabatel, 2014), sostienen que la reducción del área superficial de los humedales es debido al cambio climático ocasionando la reducción de los glaciares tropicales sobre todo en Los Andes de América del Sur.

Por otra parte, se conoce muy poco sobre la dinámica de cambios superficiales de los humedales altos andinos en los meses de baja precipitación y en periodos de décadas, más aún, en escenarios de cambio climático. Los investigadores han detectado cambios en precipitación y temperatura en las zonas alto andinas de Perú, cuya tendencia de la precipitación anual promedio es a la disminución de aproximadamente $-14.87 \text{ mm año}^{-1}$, el incremento de temperatura máxima promedio de $0.03^\circ \text{ C año}^{-1}$ y de la temperatura mínima promedio de $0.01^\circ \text{ C año}^{-1}$, de acuerdo a los valores registrados en la estación meteorológica de Marcapomacocha, Andes Centrales de Perú,

entre los años 1969-2006 (Servicio Nacional de Meteorología del Perú —SENAMHI, 2011); las áreas superficiales de los glaciares en el Perú se han reducido en 42% entre los años 1970-2010 y específicamente los glaciares que se ubican en La Cordillera de la Viuda, disminuyeron en 78.92% (Autoridad Nacional del Agua —ANA, 2014).

Las aguas subterráneas que han sido alimentadas por precipitaciones, el deshielo de los glaciares tropicales y la fusión de la nieve, son las fuentes principales de los humedales alto andinos (García y Otto, 2015; Gordon *et al.*, 2015). La topografía del terreno influye significativamente en la distribución espacial de estos humedales (Gao, Li y Brierley, 2012), así mismo (Polk *et al.*, 2017) mencionan que los cambios superficiales de los glaciares y la precipitación son los mejores predictores de los cambios superficiales de los humedales alto andinos, igualmente (Polk, 2016) determinó que los humedales en alta montaña, es decir, los que se ubican por debajo de los glaciares entre los años 1987 a 1995 han incrementado las áreas superficiales en 11%, mientras que existe la tendencia de disminución de área superficial hasta en 30% en humedales alto andinos, entre los periodos de 1985 a 2010, en lugares donde no existen glaciares (Mazzarino y Finn, 2016).

Los sensores remotos, mediante el análisis de las imágenes ópticas y los modelos de elevación digital (DEM), son herramientas potenciales para analizar dinámicas de información espacial y predecir su distribución espacial en el tiempo en humedales alto andinos (Ozesmi y Bauer, 2002; Merot *et al.*, 2003; Otto, Scherer y Richters, 2011; Gao *et al.*, 2012; Infascelli *et al.*, 2013); Zhang y Montgomery (1994) mencionan que un DEM de 10 m de resolución espacial es suficiente para evaluar procesos geomorfológicos, además, Usery *et al.* (2004), sostienen que los DEM de resoluciones espaciales entre 3 a 30 m en evaluaciones de geomorfología comparan satisfactoriamente alcanzando un valor $r=0.9$ y disminuyen gradualmente a medida que la resolución se hace más gruesa. Así mismo, el programa aeroespacial Landsat ha capturado imágenes de la Tierra desde 1972 de manera constante cada 16 días los cuales son insumos importantes para desarrollar monitoreos de ecosistemas en el tiempo.

En este contexto, es importante conocer lo que sucede con los ecosistemas que tienen relación directa con la disponibilidad u oferta natural del recurso hídrico, en especial los humedales alto andinos en periodos de décadas, por ello, nos propusimos caracterizar y evaluar los patrones del comportamiento de la magnitud de la escorrentía mediante el modelo de Índice Clima Topográfico y el área superficial de los humedales en periodos de interdécadas. Es fundamental conocer la ocurrencia de este fenómeno natural, considerando que aproximadamente 1,000 millones personas en el mundo, dependen de los bienes y servicios de estos ecosistemas (Ovando, 2010; Zeballos *et al.*, 2014; Dangles *et al.*, 2014).

Materiales y métodos

Aspectos generales del área de estudio

El lugar donde se realizó la investigación se ubica en la cordillera de La Viuda, en los Andes Centrales de Perú, en los departamentos de Lima y Junín, en un área aproximada de 400 km², un ancho promedio de 20 x 20 km, en coordenadas geográficas latitud Sur y longitud Oeste 11° 18' 45.49"; 76° 32' 50.64", 11° 11' 1.81"; 76° 21' 33.37", 11° 22' 10.00"; 76° 13' 43.20" y 11° 29' 54.34"; 76° 25' 0.63", a una altitud mínima de 3,906 y máxima de 5,359 msnm (Figura1), con precipitación promedio anual de 1,200 mm. Esta área corresponde a las zonas de vida de páramo muy húmedo-subalpino tropical, páramo pluvial-subalpino tropical y nival tropical (Ministerio del Ambiente —MINAM, 2012, con vegetación escasa, con predominio de tipo gramínea y presencia de áreas significativas de humedales de alta montaña, afloramientos de roca y presencia de glaciares en las cotas más altas.

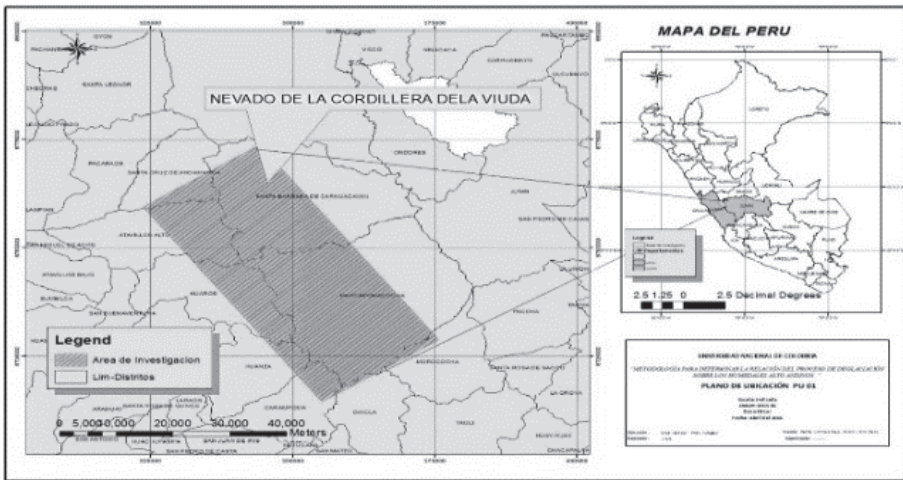


Figura 1. Zona de estudio, a la izquierda describe la ubicación de la cordillera de La Viuda con los límites de distrito y a la derecha indica la ubicación del área de estudio a nivel de departamentos.

Materiales

Imágenes de satélite: se utilizaron imágenes ópticas de tecnología Landsat, descargadas del servidor <http://glovis.usgs.gov/> (Tabla 1), del programa TM5, de 8 Bits, de seis bandas en el espectro visible, infrarrojo y una banda termal, Landsat 8 OLI, de 12 Bits de 8 bandas en el espectro visible e infrarrojo, dos bandas termales, una banda pancromática y banda cirrus; todas las imágenes corresponden al PATH 007;

ROW 068, de resolución espacial de 30 m sistema de proyección DATUM WGS84, de calidad 9, con promedio de 10% de nubosidad.

Tabla 1
Características de exactitud geométrica de las imágenes
Landsat TM5 y Landsat 8 OLI

| <i>Fecha</i> | <i>RMSE geométrico de pixel</i> | <i>Número puntos control terreno</i> |
|--------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| 06 de agosto de 1985 | 0.246 | 2,922 |
| 07 de septiembre de 1985 | 0.157 | 3,079 |
| 19 de julio de 1996 | 0.199 | 2,812 |
| 04 de agosto de 1996 | 0.185 | 2,547 |
| 13 de agosto de 2005 | 0.170 | 3,077 |
| 26 de julio de 2016 | 5.335 | 180 |

Modelo de elevación digital: los datos de modelo de elevación digital Alos Palsar, se descargaron del servidor URL, <<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>>, capturados el 01 de febrero del 2011, de código ALPSRP267536920, path 109, frame 6920, rotación Faraday 0.10°, off angle nadir 34.3°, de resolución espacial de 12.5 m, cuyo error de exactitud altitudinal mínima fue ± 2.602 m en topografía plana y máximo de $\pm 3,427$ m en topografía de terreno con pendiente pronunciada (Buitrago E. y Martínez M., 2016).

Tabla 2
Ubicación de las estaciones meteorológicas en la cordillera de La Viuda,
Perú y variables climáticas promedio anual, 1975-2016

| <i>Nombre estación</i> | <i>Coordenadas geográficas</i> | | <i>Altitud msnm</i> | <i>Variables climáticas</i> | |
|------------------------|--------------------------------|-----------------|---------------------|-----------------------------|-------------------------|
| | <i>Latitud</i> | <i>Longitud</i> | | <i>Precipitación (mm)</i> | <i>Temperatura (°C)</i> |
| Marcapomacocha | 11° 24' 15.7" | 76° 19' 30.2" | 4,500 | 1,108.11 | 4.47 |
| Yantacc | 11° 20' 00" | 76° 24' 00" | 4,600 | 806.60 | 3.45 |
| Pariacancha | 11° 23' 00" | 76° 30' 00" | 3,800 | 685.66 | – |
| Santa Bárbara | 11° 12' 12.12" | 76° 17' 8.87" | 4,150 | 911.36 | – |

Datos meteorológicos: los datos de precipitación y temperatura fueron obtenidos del SENAMHI, de las siguientes estaciones meteorológicas Marcapomacocha y Yantacc.

Los datos de las estaciones de Pariacancha y Santa Bárbara, fueron descargados del servidor URL <<http://www.peruclima.pe/?p=data-historica>>, datos históricos de precipitación de Perú clima, institución adscrita al SENAMHI (Tabla 2).

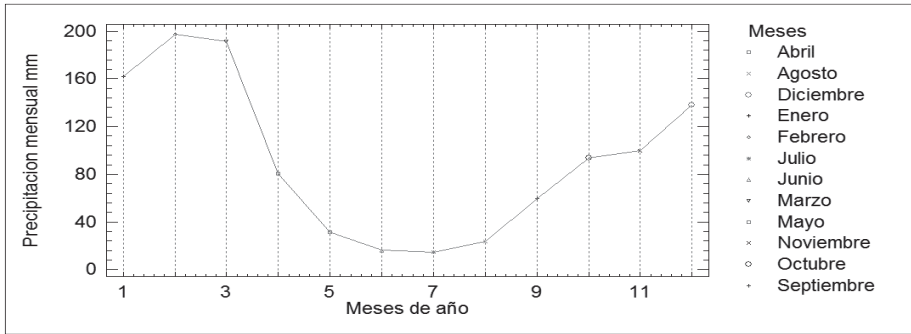


Figura 2. Patrón de precipitación mensual entre los años 1975 a 2016, de la estación meteorológica Marcapomacocha, cordillera de La Viuda, Perú.
Fuente: SENAMHI, diseño de imagen elaboración propia.

Método

Identificación de los humedales en el área de estudio

Para identificar los humedales se utilizaron las imágenes de alta resolución espacial en la plataforma Google Earth Pro, mediante las técnicas de interpretación visual en imágenes, determinando las coordenadas de los objetos más representativos para superponer los puntos de reconocimiento en la imagen Landsat. Después de hallar las zonas más representativas de los objetos de interés, en la imagen Landsat TM5 en combinación de bandas 5, 4, 3, en los canales rojo, verde y azul respectivamente, se insertaron los puntos de identificación de los humedales en la misma capa para determinar la fiabilidad.

Así mismo, se utilizaron los datos del modelo de elevación digital Alos Palsar de 12.5 m de resolución espacial, para desarrollar el proceso de predicción de distribución espacial de los humedales, mediante el algoritmo desarrollado por Merot *et al.* (2003), Infascelli *et al.* (2013), sin embargo, antes de ejecutar los algoritmos en los datos del modelo, se procedió a la extracción del área de interés con la extensión Extract by Mask de la plataforma ArcGis versión 10.3, y se generaron los algoritmos que a continuación se mencionan:

- *Paso 1. Cálculo de pendiente local:* la pendiente es un factor de control en los procesos de la superficie terrestre, se define como un ángulo existente entre el

vector de la gradiente en un punto (Felicísimo, 1994). Fue calculado con la velocidad de cambio de elevación, mediante ocho pixeles vecinos, utilizando el método de diferencias de segundo orden ajustado en cuatro u ocho pixeles vecinos, (Figura 2), se calculó mediante las siguientes ecuaciones, para obtener como salida datos raster con valores en porcentajes.

Tabla 3
Submatriz de 3 x 3 del DEM con la convención de numeración utilizado en el método de Zevenbergen

| | | |
|-------|-------|-------|
| Z_1 | Z_2 | Z_3 |
| Z_4 | Z_5 | Z_6 |
| Z_7 | Z_8 | Z_9 |

$$\left[\frac{\Delta z}{\Delta x} \right] = \left[\frac{(Z_1 + 2 * Z_4 + Z_7) - (Z_3 + 2 * Z_6 + Z_9)}{8 * X_{cellsize}} \right] \quad (1)$$

$$\left[\frac{\Delta z}{\Delta y} \right] = \left[\frac{(Z_1 + 2 * Z_2 + Z_3) - (Z_7 + 2 * Z_8 + Z_9)}{8 * X_{cellsize}} \right] \quad (2)$$

$$slope = ATAN \left(\sqrt{\left[\frac{\Delta z}{\Delta x} \right]^2 + \left[\frac{\Delta z}{\Delta y} \right]^2} \right) \left(\frac{180}{\pi} \right) \quad (3)$$

- *Paso 2. Cálculo de dirección de flujo:* la dirección de flujo está determinada por la dirección de descenso más empinado, desde cada celda y se calculó mediante la ecuación desarrollada por (Jenson y Domingue, 1988).

$$Max\ caida = \frac{\Delta\ valores\ z}{dist.cellsize * 100} \quad (4)$$

Donde:

$\Delta\ valores\ z$, es variación de cambio en Z , $dist.cellsize$, distancia multiplicado por el tamaño de la celda. Este algoritmo considera la superficie de entrada y proporciona como salida un raster que muestra la dirección de flujo que sale de cada celda a lo largo de la dirección de flujo hasta la longitud de la ruta entre los centros de la celda y se expresa en porcentajes.

- *Paso 3. Cálculo de acumulación de flujo:* se calculó de un dato de entrada de un raster de dirección de flujo, fue asignado el peso acumulado de las celdas que influyen en cada celda de pendiente descendente en el raster de salida propuesto por Jenson y Domingue (1988). En particular la función de acumulación de flujo,

fue reemplazada así: cuando se presentan valores negativos de las precipitaciones efectivas, estos fueron reemplazados por el valor de cero, aunque, las reducciones de acumulación de flujo ponderado no se ha producido en las celdas donde la cantidad de agua fue mínima; para estimar este proceso se calculó mediante las secuencias propuestas por Jenson y Domingue (1988). Obteniendo como salida un modelo de área de drenaje (Felicísimo, 1994), que se logra de la convergencia de las aguas que permiten visualizar las líneas de flujo por niveles de convergencia o intensidades categorizadas en valores cuantitativos, siendo este modelo insumo para el cálculo de distribución espacial de los humedales.

- *Paso 4. Cálculo de distribución espacial de humedales:* esta ecuación permite describir la tendencia de acumulación de una celda para acumular el flujo hídrico (Gruber y Peckham, 2009), y está basado sobre la suposición del gradiente hidráulico del agua superficial (Merot *et al.*, 2003), asumiendo como una descarga uniforme de los estados estacionarios. Para el análisis de este proceso se ejecutó el algoritmo denominado Índice Topográfica de Humedad, mediante la ecuación utilizada por (Wilson, 2002; Merot *et al.*, 2003; Infascelli *et al.*, 2013).

$$TWI = \log \left(\frac{a}{T+tn\beta} \right) \tag{5}$$

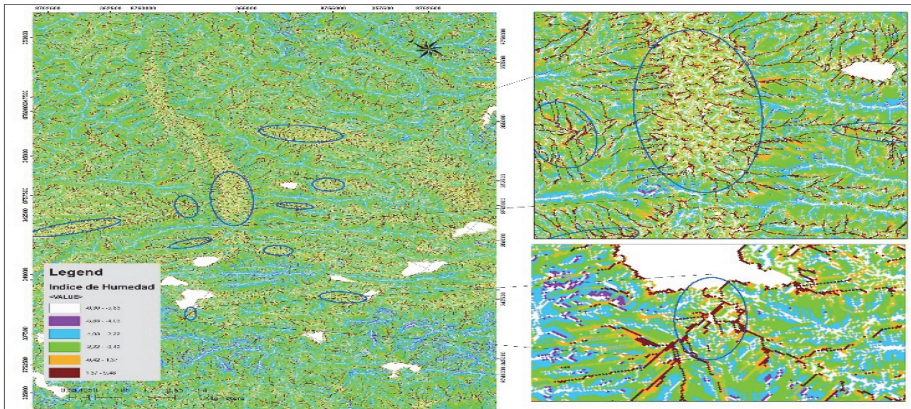


Figura 3. Mapa de distribución de humedad, elaborado de un modelo de elevación digital Alos Palsar, resolución espacial 12.5 m, los datos con valores altos describen mayor probabilidad de presencia de humedal.

Luego de obtener la distribución espacial de los humedales mediante el modelo, se ejecutó la superposición con los puntos de identificación de los humedales capturados de la imagen Google Earth Pro de alta resolución espacial del año 2016.

Evaluación de patrones de Índice Clima Topográfico

Para determinar la magnitud de escurrimiento en los humedales, se desarrolló el proceso de balance hídrico a partir de los datos de temperatura y precipitación promedio de los 10 años anteriores en el modelo de distribución espacial de humedales, mediante la ecuación propuesta por Merot *et al.* (2003); *Infascelli et al.* (2013), ingresando el valor de patrón de la precipitación efectiva anual promedio de estos años, método propuesto por Merot *et al.*, 2003, mediante la ecuación denominada Índice Clima Topográfico (ICT):

$$ICT = \log\left(\frac{\alpha}{T * \tan\beta}\right) + \log(Vr) \cong \log\left(\frac{\alpha * Vr}{T * \tan\beta}\right) \quad (6)$$

Donde:

α es el valor del área de drenaje,

Vr es el volumen de la precipitación efectiva anual promedio de los 10 años anteriores al periodo de evaluación, que es la diferencia de la precipitación anual menos el valor de la evapotranspiración potencial anual, para los años de 1985, 1996, 2005 y 2016, que se obtuvo por la diferencia de la precipitación media anual de los 10 años anteriores respecto a la evapotranspiración potencial anual promedio de la década pasada (ETP) y β es la pendiente local.

Así mismo, para estimar la ETP, fue necesario obtener las temperaturas promedio en las estaciones meteorológicas faltantes ver (Tabla 2) mediante la relación propuesta por Böhner y AntoniĆ (2009), teniendo en cuenta la siguiente expresión:

$$Tz = Tb - \Delta T * \left(\frac{z-zb}{1000}\right) \quad (7)$$

Donde:

Tz es el valor de la temperatura a conocer,

Tb valor de la temperatura de la estación conocida,

ΔT es el valor de la gradiente equivalente a 0.0065 °C,

z es la cota altitudinal del punto a conocer y

zb es la cota altitudinal de la estación conocida.

Por este proceso se conocen los valores de temperaturas medias en las estaciones faltantes en los puntos de interés, se estimó la ETP, mediante el método propuesto por Thornthwaite, que se calculó en función de la temperatura promedio con la siguiente ecuación:

$$ETP = 16(10T/I)^\alpha \quad (8)$$

Donde:

ETP es el valor resultante de evapotranspiración potencial,

T es la temperatura media mensual,

I es el índice de calor anual,

α es el exponente empírico que está en función de I ,

y el valor de I se ha estimado mediante la siguiente ecuación:

$$I = \sum_{k=1}^{n12} (T/5)^{1.514} \quad (9)$$

El valor de α exponente empírico se determinó mediante la siguiente expresión:

$$\alpha = 675 * 10^{-9} * I^3 + 771 * 10^{-7} * I^2 + 1792 * 10^{-5} * I + 0.49239 \quad (10)$$

Obtenidos los valores de precipitación efectiva en las cuatro estaciones meteorológicas se ejecutó el proceso de interpolación mediante la extensión (*local polynomial interpolation*) en plataforma ArcGis 10.3, obteniendo como salida un modelo de distribución espacial de precipitación efectiva. Finalmente, se ejecutó la Ecuación (6) para los diferentes periodos encontrando como salida modelos de ICT donde la cantidad de píxeles con alto valor de escurrimiento tienen alta probabilidad de existencia de humedales, estos píxeles fueron reclasificados para determinar el área superficial en los diferentes periodos, para obtener el patrón de comportamiento.

Evaluación de humedales mediante imágenes

- *Paso 1. Pre procesamiento de imágenes:* después de haber descargado las imágenes ópticas capturadas en los periodos mencionados (Tabla 1), se realizaron los procesos de corrección de las imágenes en el software ENVI versión 5.1 Environment for Visualizing Images, que consiste en desarrollar la corrección radiométrica y corrección de reflectancia a nivel de superficie. El proceso de corrección radiométrica se realizó mediante el algoritmo propuesto por Chander *et al.* (2009), que consiste en convertir los valores de los píxeles de cada banda de niveles digitales (ND) en valores de radiancia (Carmona *et al.*, 2011), mediante la siguiente expresión:

$$L\lambda_{sat} = G\lambda * ND + B\lambda \quad (11)$$

Dónde:

λ indica el número de la banda de la imagen, $G\lambda$ y $B\lambda$ son los valores del coeficiente de transformación que se encuentra en la metadata de la imagen, ND son los valores de nivel digital de la imagen de cada banda en unidades de $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$, proceso necesario para continuar con el algoritmo de corrección de reflectancia a nivel de superficie.

La corrección de reflectancia a nivel de la superficie, consiste en convertir los valores de niveles de radiancia en valores de reflectividad a nivel de superficie, considerando una superficie Lambertiana, es decir la imagen representa una zona de superficie plana, libre de nubes (Schroeder, Cohen, Song, Canty y Yang, 2006), con el método de sustracción de superficies oscuras desarrollada por Chavez (1996), Schroeder *et al.* (2006), Zhang *et al.* (2010).

$$\sigma\lambda sup = \frac{\pi(Lsat\lambda - L\lambda p)d^2}{T\nu\lambda(E\lambda o + \cos(\theta\lambda z)Tz\lambda + E\lambda down)} \quad (12)$$

Dónde:

$\sigma\lambda sup$ es la reflectividad a nivel de superficie, d es la distancia tierra-sol,

$E\lambda o$ es la irradiancia solar espectral exoatmosferica ($wm^{-2}\mu m^{-1}$),

$\theta\lambda z$ es el ángulo cenital solar,

$L\lambda p$ es el path radiance ($wm^{-2}\mu m^{-1}$), que puede ser estimado a partir de objetos oscuros en la propia imagen (Zhang *et al.*, 2010),

$T\nu\lambda$ y $Tz\lambda$ son las transmisividades atmosféricas, y

$E\lambda down$ es la irradiancia difusa del cielo hacia abajo ($wm^{-2}\mu m^{-1}$).

- *Paso 2. Procesamiento de imágenes:* después de haber obtenido la estandarización de las imágenes en diferentes periodos, para evaluar la evolución multitemporal en los humedales, se desarrolló el cálculo de los humedales en unidades de hectáreas (ha). Utilizando el algoritmo de Índice Normalizado de Vegetación Diferenciada (NDVI) desarrollado por Rouse *et al.* (1973), cuya respuesta espectral varía entre -1 a 1; método eficiente para identificar humedales alto andinos (Otto *et al.*, 2011; Adauto y Bram, 2011; Garcia y Otto, 2015), que se encuentran en los rangos de valores entre 0.420 a 0.575 (Adauto y Bram, 2015). Los valores de los pixeles que corresponden a los humedales alto andinos fueron reclasificados para estimar el área superficial en diferentes periodos, con el fin de encontrar el modelo de patrón de cambio en periodos de interdécadas.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (13)$$

Cuyos valores asignados es como sigue: NIR son los valores a nivel de reflectancia de la banda que se encuentra en el espectro infrarrojo, RED banda en el espectro rojo.

La Figura 4 presenta de forma esquemática la metodología propuesta.

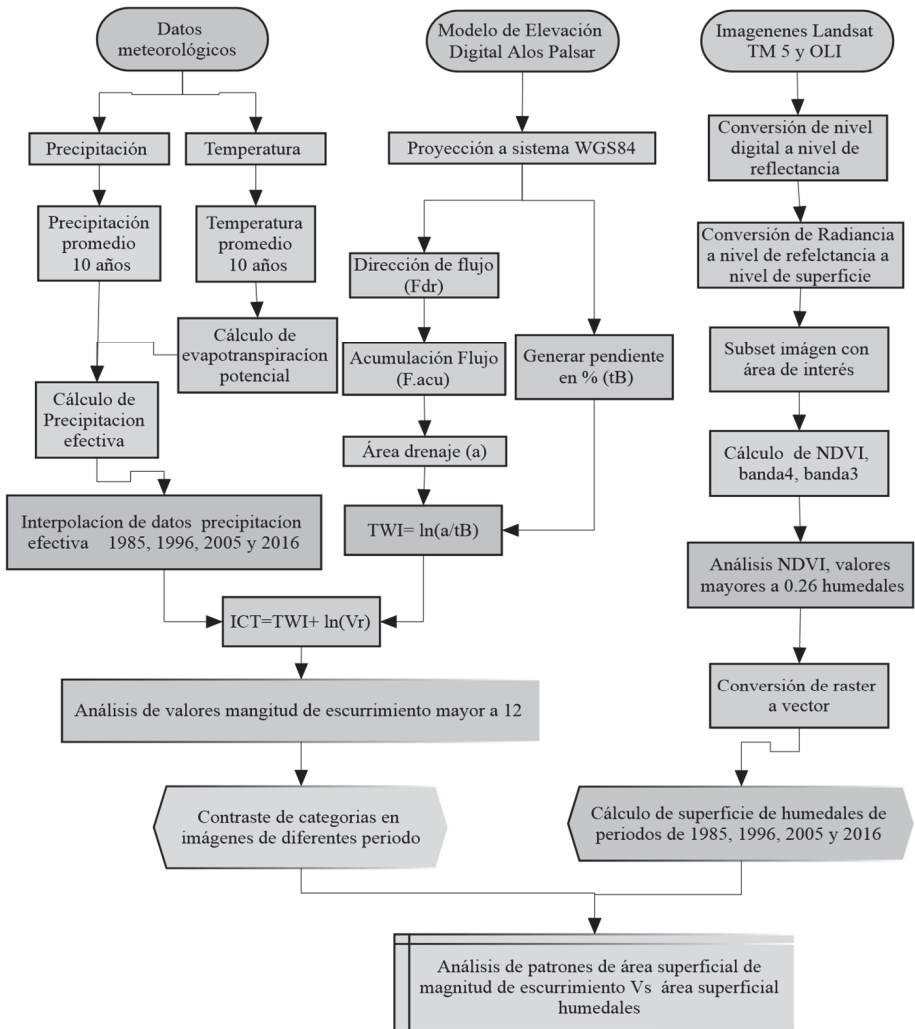


Figura 4. Proceso metodológico para análisis de patrones de magnitud de escurrimiento y el área superficial de los humedales alto andinos.

Resultados y discusiones

Después de desarrollar los procesos metodológicos de identificación de humedales en imágenes y modelos de elevación digital, se evaluaron los patrones de comportamiento de áreas superficiales de los humedales y los patrones de comportamiento de magnitud de escurrimiento, donde se alcanzaron los siguientes resultados:

Las áreas superficiales de los humedales y la magnitud de escurrimiento, disminuyeron entre los años 1985 a 1996, aumentó entre los años 1996 a 2005; entre los años 2005 y 2016 el área superficial de los humedales aumentó y la magnitud de escurrimiento disminuyó. En general, entre los años de 1985 a 2016, el área superficial de magnitud de escurrimiento y de los humedales ha disminuido en 349.00 ha y 1,367.71 ha, respectivamente (véase Figura 5).

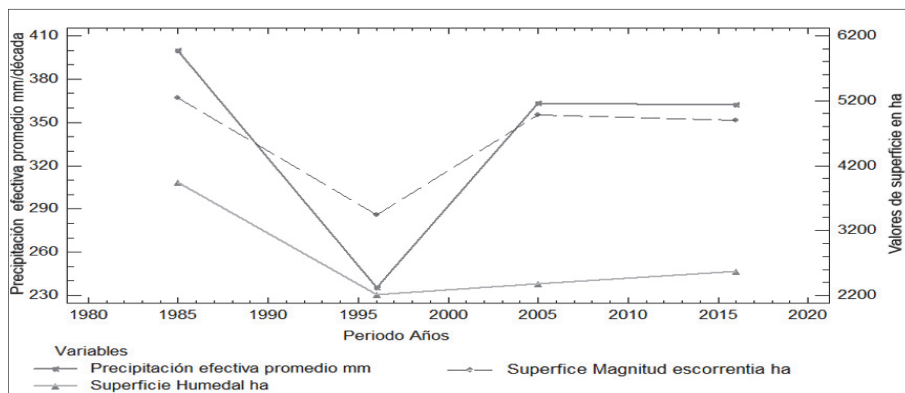


Figura 5. Compara los patrones de comportamiento de precipitación efectiva promedio de las últimas décadas, las áreas superficiales de los humedales y las áreas superficiales de las magnitudes de escorrentía.

En la Figura 5, se observa que los patrones de áreas superficiales de los humedales y las superficies de la magnitud de escorrentía tienen respuestas similares en los últimos 30 años, también (Polk *et al.*, 2017) explica que existe una relación directa entre las superficies de los humedales con la precipitación y los caudales de escorrentía aguas abajo de la pendiente, coincidiendo con los resultados que se describen, además, concluye que existe una conectividad directa entre ambas variables.

Identificación de los humedales

Después de ejecutar el algoritmo de análisis de NDVI, las coberturas de los humedales alto andinos, se encontraron en rango de valores diferentes en periodos distintos (Tabla 4), en épocas de poca precipitación (Figura 2) patrón de precipitación anual en el área de estudio, los valores en histogramas de NDVI, en los diferentes periodos se hallaron en rango de valores entre -1 y 1, presentando una distribución distinta entre sí (Figura 6).

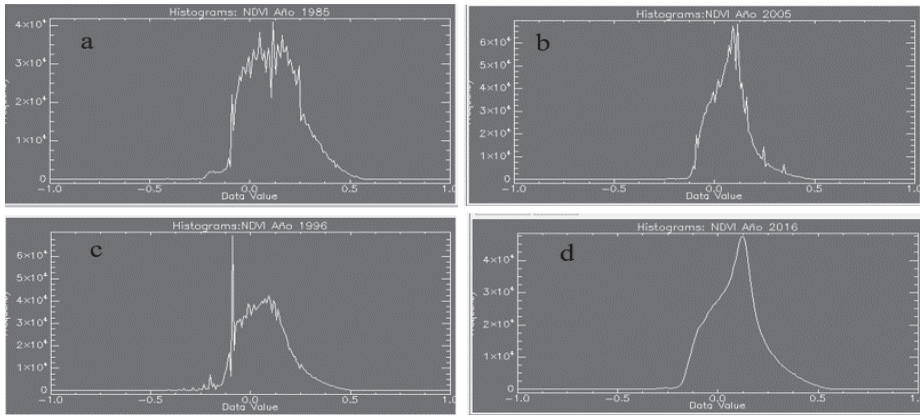


Figura 6. Frecuencias de valores de NDVI en la zona de estudio cuyos rangos de valores varían entre -1 a 1 a) histograma de periodo de 1985, b) 1996, c) 2005, y d) 2016.

Tabla 4
Rango de valores de NDVI de toda el área de estudio, media, desviación estándar y umbral de valores que corresponde a humedales en los diferentes periodos

| <i>NDVI Periodo</i> | <i>Valor Min</i> | <i>Valor Max</i> | <i>Mean</i> | <i>SD</i> | <i>Humedal</i> |
|---------------------|------------------|------------------|-------------|-----------|----------------|
| NDVI 1985 | -1.0000 | 1.0000 | 0.1230 | 0.1366 | ≥ 0.320 |
| NDVI 1996 | -1.0000 | 1.0000 | 0.0712 | 0.1251 | ≥ 0.300 |
| NDVI 2005 | -1.0000 | 1.0000 | 0.0825 | 0.1016 | ≥ 0.260 |
| NDVI 2016 | -1.0000 | 1.0000 | 0.0939 | 0.1360 | ≥ 0.340 |

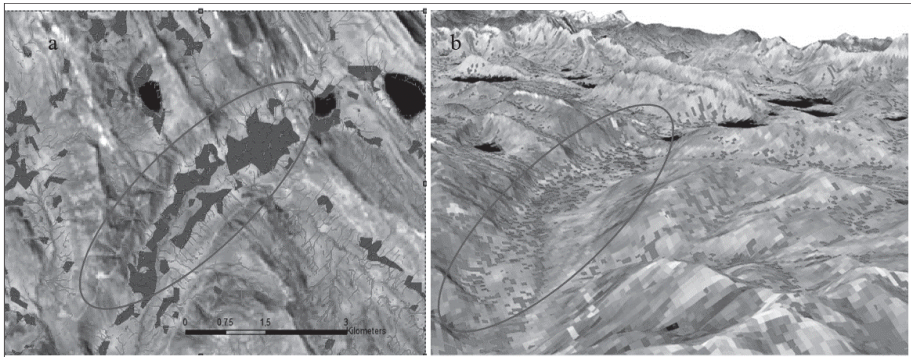


Figura 7. Los segmentos de color rojo describen los valores altos de índice de escurrimiento y las que superponen con polígono de color verde corresponden a las zonas donde se encuentra los humedales. a) vista plano vertical de la imagen, b) vista de perfil en modelo de elevación digital de terreno Alos Palsar superpuesto con la imagen Landsat y capa de valores altos de escurrimiento.

El análisis NDVI es una técnica eficiente que permite identificar las superficies de los humedales permanentes. Se obtuvo cada imagen con diferentes umbrales y valores de desviación estándar variables (véase Tabla 4), en estos ecosistemas extremos y en los meses de escasa precipitación, hay poca probabilidad de existencia de vegetación siempre verde que esté asociada a áreas inundadas y que tenga valores altos al umbral descrito, los vegetales que emiten valores altos de reflectancia están asociados a áreas inundadas (véase Figura 7). Los valores distintos de los umbrales están asociados a la magnitud de precipitación, con relación a lo anterior, Otto *et al.* (2011), reportaron que valores superiores a 0.27, corresponden a humedales evaluados en meses de escasa precipitación, mientras que valores superiores a 0.43, corresponden a estos ecosistemas en periodos de alta precipitación; del mismo modo, Aducci y Bram (2015), describen que en época de mayor humedad en el espectro visible (0.4 a 0.7 μm), los valores de reflectancia son más bajos, debido a un mayor contenido de clorofila en las plantas, en la región infrarrojo cercano (0.7 a 1.3 μm), la pendiente es más pronunciada por haber mayor vigor de vegetación para esta época y en época seca existe menor pendiente en el espectro de infrarrojo cercano debido a un menor vigor de la vegetación.

Por otro lado, los valores máximos de la salida del algoritmo topográfico de humedad indican la ubicación de las áreas saturadas o cuerpos de agua (véanse Figuras 3 y 7), los segmentos con altos valores finalizan en áreas con topografía plana o ligeramente plana (véase Figura 7) cuando se genera la visualización en 3D, también, estos segmentos describen las áreas de pendiente arriba las que cooperan con la intensidad de flujo de agua por gravedad, y los valores mínimos indica las áreas con menos intensidad de flujo; sin embargo (Merot *et al.*, 2003; Sørensen y Seibert, 2007), describen obtener mejores resultados con DEM de resolución espacial 50 metros en terrenos con topografía plana o ligeramente plana porque han demostrado que a mayor tamaño del pixel es mayor el valor del índice y existe más generalización, pero en terrenos con topografía accidentada los detalles de topografía son fundamentales y estos están asociados a mayor resolución de pixel, indicando menos generalización en los índices pero mayor detalle (Sørensen y Seibert, 2007). Además (Merot *et al.*, 2003; Ye, Liu y Ning, 2010; Infascelli *et al.*, 2013), describen que el modelo de Índice Clima Topográfico, permite obtener mejores resultados que el Índice Topográfico de Humedad; por otro lado, Merot *et al.* (2003); Ye *et al.* (2010), explican que integrar las variables climáticas en la superficies ayudan a discriminar con eficacia los humedales.

Cuando se superponen las capas de NDVI con valores que corresponden a los humedales, las áreas de mayor intensidad de flujo o magnitud de escorrentía y la combinación de las bandas RGB 5, 4, 2 de la imagen Landsat, se observa que los valores altos de Índice Topográfico de Humedad, finalizan y se superponen con los

polígonos de los humedales obtenidos por NDVI (véase Figura 7a) y los valores mínimos corresponden a la divisoria de las aguas (picos, crestas áreas con pendientes pronunciadas).

Los resultados que se observan en la Tabla 5, tienen intervalos de confianza de 10% y una probabilidad estimada al 90%, estos criterios fueron propuestos por Francois *et al.* (2003), quienes sugieren que para cada estrato o tipo de cobertura, obteniendo menor probabilidad de exactitud temática en la metodología de ICT y mayor probabilidad con la combinación de ICT y NDVI. Del mismo modo (Ye *et al.*, 2010), describen que aplicando el método de ICT ayuda a mejorar la robustez y fiabilidad de distribución espacial de las áreas saturadas, además, el ICT junto con otras variables parecen ser una técnica eficiente para discriminar los humedales especialmente en zonas de mayor cota altitudinal.

Tabla 5
Presenta el porcentaje de exactitud de clasificación de identificación de humedales alto andinos con técnicas diferentes y combinadas

| <i>Tipo datos</i> | <i>Cobertura</i> | <i>Humedales</i> | <i>Otros</i> | <i>Muestra</i> | <i>Exactitud clasificación</i> |
|-------------------|------------------|------------------|--------------|----------------|--------------------------------|
| ICT de DEM | | 17 | 18 | 35 | 48.57% |
| NDVI de Landsat | Humedales | 29 | 6 | 35 | 82.28% |
| ICT de DEM y NDVI | | | | | |
| de Landsat | | 29 | 6 | 35 | 82.28% |

Patrones en humedales y en magnitud de escurrimiento

Los patrones de comportamiento de las áreas superficiales de los humedales alto andinos en los periodos de 1985, 1996, 2005 y 2016 fue de 3,937.51 ha; 2009, 19 ha, 2,379.53 ha y 2,569.80 ha, respectivamente, en los periodos de baja precipitación entre los meses de julio y agosto, donde disminuye 1,928.32 ha entre 1985 a 1996; entre 1996 a 2005 se incrementa en 370.34 ha, y disminuye 190.27 ha entre 2005 a 2016.

Magnitud de escurrimiento

La Tabla 6 muestra los valores estadísticos de los datos de salida del índice Clima Topográfico, el número de celdas asociados a alta magnitud de escurrimiento a valores mayores de 12, patrón de área superficial de alta magnitud de escurrimiento en diferentes periodos.

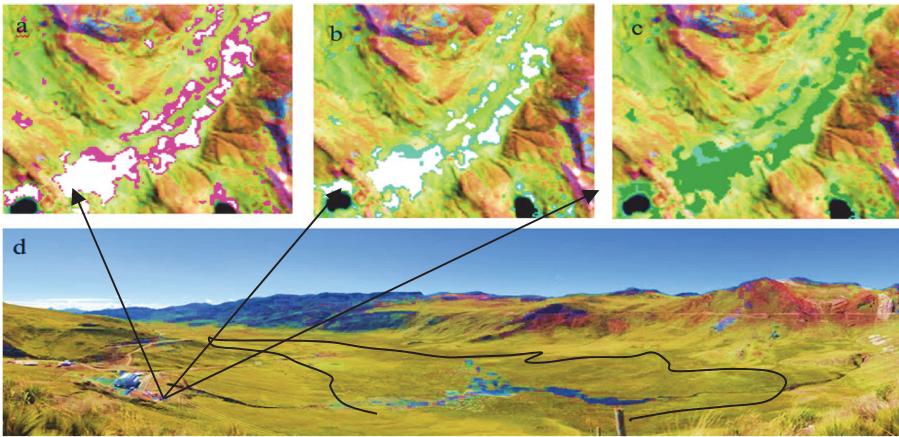


Figura 9. Patrones de comportamiento de áreas superficiales de los humedales en la zona de estudio: a) polígono RGB 255; 0, 194 humedales de 1985; polígono RGB 255, 255, 255 humedales de 1996, b) polígono de humedales de 1996 y polígono RGB 0.255, 197 humedales del 2005, c) polígono de humedales del 2005 y polígono RGB 56,168.0 humedales del 2016, y d) vista panorámica de la zona evaluada, fotografía publicada por L. Ramírez, 2014.
Fuente: Panoramio.

Tabla 6
Valores estadísticos de los datos de salida del Índice Clima Topográfico

| Descripción | 1985 | 1996 | 2005 | 2016 |
|--|---------|---------|---------|---------|
| Valor mínimo | 3.494 | 3.465 | 3.589 | 3.918 |
| Valor máximo | 21.019 | 20.455 | 20.635 | 20.647 |
| Media | 9.66 | 8.962 | 9.611 | 9.594 |
| Desviación estándar | 1.859 | 1.868 | 1.836 | 1.852 |
| Número celdas asociados a alta magnitud de escurrimiento ≥ 12 | 336413 | 220406 | 319521 | 314041 |
| Superficie asociada a alta magnitud de escurrimiento ≥ 12 en (ha) | 5248.04 | 3438.33 | 4984.53 | 4899.04 |

Los patrones de comportamiento de las áreas superficiales de magnitud de escurrimiento mayores al valor de 12 unidades en los periodos de 1985 a 1996 disminuyó en 1,809.71 ha, entre 1996 a 2005 aumentó en 1,546.20 ha; entre 2005 a 2016 disminuyó en 85.04 ha.

Merot *et al.* (2003), mencionan que los altos valores de Índice Clima Topográfico, indican los umbrales de ubicación espacial de los humedales, que efectivamente coincide con esta afirmación, además, el Índice Clima Topográfico parece ser capaz de

predecir la estructura y la distribución espacial de los humedales (Merot *et al.*, 2003), igualmente, Merot *et al.* (2003), explican que mediante esta técnica es más sencillo predecir humedales con áreas superficiales considerables respecto a humedales de menor superficie, sin embargo, en nuestro análisis fue más sencillo predecir humedales de menor área superficial que los de mayor área superficial, este efecto de contradicción se genera probablemente por el tamaño de pixel y el tipo de topografía de terreno, porque la topografía de terreno donde desarrolló la investigación Merot *et al.* (2003), fue menos accidentado respecto al área donde nosotros desarrollamos.

Conclusiones

Los modelos digitales de elevación y las imágenes de satélite son datos fundamentales para desarrollar monitoreos de ecosistemas semi-acuáticos o emergentes. Para zonas inaccesibles, las técnicas geomáticas, aportan información importante para entender dinámicas espaciales como son el comportamiento y efectos en el tiempo de los cambios que ocurren en estos ecosistemas, obteniendo información valiosa para la toma de decisiones.

Del análisis de NDVI, los valores superiores a 0.26, corresponden a humedales alto andinos, en imágenes capturadas en periodos de escasa precipitación, porque están asociados a factores climáticos, teniendo en cuenta que esta variable afecta de manera directa al vigor de la vegetación y a la disponibilidad de agua superficial; este efecto hace que se obtengan diferentes respuestas espectrales sobre un mismo objeto, así mismo, los valores altos de Índice Clima Topográfico, indican alta probabilidad de ubicación de las áreas saturadas y superponiendo estas capas, se confirma la probabilidad de encontrar la distribución espacial de los humedales alto andinos.

Los métodos combinados de ICT desarrollado de los DEM, y NDVI generados de imágenes ópticas mejoran la robustez y fiabilidad para obtener la distribución espacial de los humedales alto andinos que coincidimos con Ye *et al.* (2010), sin embargo, el modelo de ICT no es una técnica eficiente para delinear estos ecosistemas sobre todo en terrenos accidentados.

Cuando las áreas superficiales de los humedales disminuyen también las áreas superficiales de la magnitud de escurrimiento disminuye, además, si las áreas superficiales de los humedales aumentan, también las áreas superficiales de la magnitud de escurrimiento aumentan; se presume que existe conectividad entre las variables o relación directa entre las áreas superficiales de los humedales y la magnitud de escurrimiento.

Bibliografía

Adauto y Bram, "Identificación de humedales alto andinos integrando imágenes Landsat Aster GDEM con Arbol de decisión sobre la cabecera de las cuencas de

- Pisco y Pampas en Huancavelica, Perú”, *Geoprocessamento No Informe Epidemiológico Da Distribuição de Padrões Espaciais de Indicadores Da Mortalidade Infantil No Estado de Goiás*, no. 1, pp. 6381-6388, 2015. Retrieved from file: <///scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-22162015000200004&lang=pt>.
- Autoridad Nacional del Agua —ANA, *Inventario de Lagunas Glaciares del Perú*, 2, 2014, <<https://doi.org/10.1029/2004GL020706>.Bury>.
- Böhner, J., and Antoniú, O. (2009). “Chapter 8 Land-Surface Parameters Specific to Topo-Climatology”, *Developments in Soil Science*, vol. 33, no. 8, pp. 195-226, <[https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00008-1](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00008-1)>.
- Buitrago E., J.Y., and Martínez M., L.J., “Digital elevation models (DEM) used to assess soil erosion risks: a case study in Boyaca, Colombia”, *Agronomía Colombiana*, vol. 34, no. 2, p. 239, 2016, <<https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v34n2.56145>>.
- Carmona *et al.*, “Caracterización espectral del estuario del río Quequén Grande por medio de imágenes Landsat”, in F.C. y D.O. Raúl Rivas (eds.), vol. 1, pp. 11-29, 2011, Buenos Aires, Argentina.
- Chander *et al.*, *Summary of Current Radiometric Calibration Coefficients for*, no. 1, pp. 1-24, 2009.
- COP9 DOC.26, R., *Ramsar COP9 DOC . 26 Documento de información Estrategia Regional de Conservación y Uso Sostenible de los Humedales Altoandinos*, vol. 2005, Retrieved from <http://archive.ramsar.org/pdf/cop9/cop9_doc26_s.pdf>.
- Dangles, O.; Meneses, R.I.; Anthelme, F.; Dangles, O.; Meneses, R.I.; Anthelme, F. y Un, B., “BIOTHAW: un proyecto multidisciplinario que propone un marco metodológico para el estudio de los bofedales altoandinos en un contexto de cambio climático”, *Revista del Instituto de Ecología*, vol. 49, núm. 3, pp. 6-13, 2014.
- Felicísimo, A., *Modelos digitales del terreno: introducción y aplicaciones a las ciencias ambientales*, Oviedo, Universidad de Oviedo, 118, 1994. Retrieved from <<http://www6.uniovi.es/~feli/pdf/libromdt.pdf>>.
- Gao, J., Li, X., and Brierley, G., “Topographic influence on wetland distribution and change in Maduo County, Qinghai-Tibet Plateau, China”, *Journal of Mountain Science*, vol. 9, no. 3, pp. 362-371, 2012. <<https://doi.org/10.1007/s11629-009-2263-0>>.
- Garcia and Otto, “Caracterización ecohidrológica de humedales alto andinos usando imágenes de satélite multitemporales en la cabecera de cuenca del Río Santa, Ancash, Perú”, *Ecología Aplicada*, vol. 14, núm. 2, pp. 115-125, 2015. Retrieved from <file:///scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-22162015000200004&lang=pt>.
- Gordon, R.P.; Lautz, L.K.; McKenzie, J.M.; Mark, B.G.; Chavez, D. and Baraer, M., Sources and pathways of stream generation in tropical proglacial valleys of the

- Cordillera Blanca, Peru”, *Journal of Hydrology*, no. 522, pp. 628-644, 2015, <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.013>>.
- Gruber, S. and Peckham, S., “Chapter 7 Land-Surface Parameters and Objects in Hydrology”, *Geomorphometry Concepts, Software, Applications*, no. 33, chapter 20, pp. 171-194, 2009, <[https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00007-X](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00007-X)>.
- Infascelli, R.; Faugno, S.; Pindoizzi, S.; Boccia, L. and Merot, P., “Testing Different Topographic Indexes to Predict Wetlands Distribution”, *Procedia Environmental Sciences*, no. 19, pp. 733-746, 2013. <<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.082>>.
- Jenson, S.K. and Domingue, J.O., “Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis”, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 54, no. 11, pp. 1593-1600, 1988, <[https://doi.org/0099-1112/88/5411-1593\\$02.25/0](https://doi.org/0099-1112/88/5411-1593$02.25/0)>.
- Jones, K.; Lanthier, Y.; van der Voet, P.; van Valkengoed, E.; Taylor, D. and Fernández-Prieto, D., “Monitoring and assessment of wetlands using Earth Observation: The GlobWetland project”, *Journal of Environmental Management*, vol. 90, no. 7, pp. 2154-2169, 2009, <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.07.037>>.
- Mazzarino, M. and Finn, J.T., “An NDVI analysis of vegetation trends in an Andean watershed”, *Wetlands Ecology and Management*, vol. 24, no. 6, pp. 623-640, 2016, <<https://doi.org/10.1007/s11273-016-9492-0>>.
- Merot, P.; Squidant, H.; Arousseau, P.; Hefting, M.; Burt, T.; Maitre, V., Viaud, V., “Testing a climato-topographic index for predicting wetlands distribution along an European climate gradient”, *Ecological Modelling*, vol. 163, no. 1-2, pp. 51-71, <[https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00387-3](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00387-3)>.
- Michishita, R.; Jiang, Z.; Gong, P. and Xu, B., “Bi-scale analysis of multitemporal land cover fractions for wetland vegetation mapping”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, no. 72, pp. 1-15, 2012, <<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.04.006>>.
- Otto, M.; Scherer, D. and Richters, J., “Hydrological differentiation and spatial distribution of high altitude wetlands in a semi-arid Andean region derived from satellite data”, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 15, no. 5, pp. 1713-1727, 2011, <<https://doi.org/10.5194/hess-15-1713-2011>>.
- Ozesmi, S.L. and Bauer, M.E., *Satellite remote sensing of wetlands*, pp. 381-402, 2002.
- Polk, M.H.; Young, K.R.; Baraer, M.; Mark, B.G.; McKenzie, J.M.; Bury, J. and Carey, M., “Exploring hydrologic connections between tropical mountain wetlands and glacier recession in Peru’s Cordillera Blanca”, *Applied Geography*, no. 78, pp. 94-103, 2017, <<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.11.004>>.

- Ramsar, Irán, *Manual de la Convención de Ramsar*, 4a. ed., 2006, Retrieved from <http://www.ramsar.org/pdf/lib/lib_manual2006s.pdf>.
- Rasmus Sørensen and Seibert, J., *Effects of DEM resolution on the calculation of topographical indices : TWI and its components*, Elsevier, December, 2007, 2007, <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.09.001>>.
- Schroeder, T.A.; Cohen, W.B.; Song, C.; Canty, M.J. and Yang, Z., “Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Oregon”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 103, no. 1, pp. 16-26, 2006, <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.03.008>>.
- SENAMHI, *Escenario de cambio climático en la cuenca del río Mantaro para el año 2100*, 2011, Retrieved from <<http://www.care.org.pe/wp-content/uploads/2015/06/6-PRAA-Escenarios-de-Cambio-Climatico-Cuenca-del-Mantaro-al-2100-Junin.pdf>>.
- Vidal, L.; Delgado, J. y Andrade, G., “Factores de la vulnerabilidad de los humedales altoandinos de Colombia al cambio climático global”, *Revista Colombiana de Geografía*, vol. 22, núm. 2, pp. 69-85, 2013.
- Wilson, J.P., *Terrain-Based Descriptions of Earth Surface and Atmospheric Processes*, University of Southern California, 19, 2002, retrieved from <<http://johnwilson.usc.edu/wp-content/uploads/2016/05/2002-Wilson-Terrain-Based-Desc-.pdf>>.
- Ye, Y.; Liu, G. and Ning, J.; “Wetland Mapping Using Classification Trees to Combine TM Imagery and Climato-topographical Index in Zoige Plateau”, 3rd International Congress on Image and Signal Processing (CISP2010), 2010, 1989-1993.
- Zeballos, A.; Soruco, A.; Cusicanqui, D.; Joffre, R. and Rabatel, A., “Uso de imágenes satelitales, modelos digitales de elevación y sistemas de información geográfica para caracterizar la dinámica espacial de glaciares y humedales de alta montaña”, *ResearchGate*, July 2015, pp. 14-26, 2014.
- Zhang, Z.; He, G. and Wang, X., “A practical DOS model-based atmospheric correction algorithm”, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 31, no. 11, pp. 2837-2852, 2010, <<https://doi.org/10.1080/01431160903124682>>.