

Propuesta de un Índice de Bofedal para la Teledetección de Bofedales en Cabeceras de Cuenca
Usando Datos Imágenes de los Sensores TM, OLI a bordo de los Satélites Landsat - Caso
Estudio: Bofedal Chunal, Cuenca Alta del río Chillón.

Jorge L. Garcia D^{1,2}.

E-mail: jlgd01@hotmail.com / jorge.garcia@unmsm.edu.pe

Bram L. Willems^{1,2}

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

Raúl Espinoza V.^{1,2}

respinozavillar@gmail.com

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

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

RESUMEN

Esta investigación propondrá un Índice de Bofedal (IDB) para identificar y cuantificar los bofedales de puna, ubicados sobre los 3800 msnm. Se procesaron datos imágenes de los sensores TM, ETM+ y OLI que están bordo de los satélites Landsat, de los año 1986 al 2015. Para proponer el IDB recurrimos a los resultados de dos metodologías previamente evaluadas: Una de las metodologías está basada en los resultados de la clasificación empleando la firma espectral, que seleccionó una firma espectralmente pura, enmember (EM) para el EM bofedal, EM roca y EM suelo, con estos EMs se realizó la clasificación usando la técnica Linear Spectral Unmixing (LSU). La segunda metodología se basa en los resultados que generaron los mapas de distribución espacial de los índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) y Diferencia Normalizada Índice de infrarrojos (NDII), que zonificaron los bofedales reconocidos en los trabajos de campo. Finalmente en base a estas dos metodologías y haciendo correlaciones entre el porcentaje de fracción de endmember bofedal y los índices NDVI, NDWI, NDII de bofedales, se propuso un IDB para generar mapas de bofedales, este IDB solo utiliza tres bandas ρ GREEN, ρ NIR y ρ SWIR y zonifica de manera directa los bofedales.

Palabras claves: Bofedal, Índices, Chillón

ABSTRACT

This research will propose a Bofedal's Index (BI) to identify and quantify the puna's bofedales, located at 3800 meters above sea level. Images data of the TM, ETM + and OLI sensors which are on board the Landsat satellites were processed from 1986 to 2015. To propose the BI we used the results of two previously evaluated methodologies: One of the methodologies is based on the classification results using the spectral signature, which was selected by a spectrally pure signature, "enmember" (EM) for bofedal EM, "rock" MS and "soil" MS, with these MSs the classification was performed using the Linear Spectral Unmixing (LSU) technique. The second methodology is based on the results that generated spatial distribution maps of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Water Index (NDWI), and Normalized Difference Infrared Index (NDII), which zoned the recognized bofedales in field work. Finally, on based for these two methodologies and making correlations between the fraction percentage of bofedal endmember and the indexes NDVI, NDWI, NDII of bofedales, a IB was proposed to generate bofedales' maps, this IB only uses three bands ρ GREEN, ρ NIR and ρ SWIR and zonifies the bofedales directly way.

Keywords: Bofedal, Index, Chillón

1. INTRODUCCION

Los bofedales son humedales de altura y constituyen sistemas frágiles, en vista de que pueden ser fácilmente alterados si no son preservados de manera sostenible (Flores, 2002). Se ubican en la región Puna desde los 3 800 m.s.n.m hasta los pies de glaciares y a lo largo de las márgenes de los ríos y manantiales de los territorios andinos de Perú, Bolivia, Chile y Argentina (Gil, 2011). A pesar de su limitada extensión, los bofedales son ecosistemas estratégicos de reserva y sostenibilidad del ciclo hidrológico. Según el Ministerio de Ambiente del Perú (MINAM) (2015), los bofedales constituye un ecosistema hidromórfico distribuido en la región altoandina, a partir de los 3800 m.s.n.m., y ocupa una superficie total de 544562 ha, lo que representa el 0.42% del total Peruano. El bofedal presenta vegetación natural, siempre verde, de elevado potencial forrajero y con suelo permanentemente húmedo apto para el pastoreo principalmente de alpacas, este tipo de ecosistema que constituye un campo natural de pastoreo (Prieto, 2001). A pesar que son zonas de poca extensión, los bofedales en la larga época de estiaje y frecuentes sequías, se convierten en las únicas fuentes de agua y reserva alimentaria, garantizando así una producción de ganado (Alzéraca, 2001).

2 OBJETIVO GENERAL

Proponer un Índice de Bofedal para el monitoreo espacial y temporal de ecosistemas de bofedales de puna mediante técnicas de teledetección por satélite.

3 ÁREA DE ESTUDIO

En el presente estudio se tomó como zona de estudio la cabecera de la cuenca del río Chillón. La cuenca del río Chillón se encuentra ubicada en las provincias de Lima y Canta, en el departamento de Lima, Perú Figura 1 A, al Norte de la Ciudad de Lima, Geográficamente se encuentra entre las coordenadas E 76° 21' 55" a 77° 10' 49" W y N 11° 18' 23" a 12° 00' 00" S. La cuenca del río Chillón es integrante de la cuenca hidrográfica del Océano Pacífico. El río Chillón Nace en un conjunto de lagunas: Pucracocha, Aguascocha y Chuchón, sobre los 4.800 msnm. y desciende hasta el nivel del mar en 126 kilómetros, cuando desemboca en el océano Pacífico (Olarte N., Bertha. 2002) Figura 1 A. El bofedal piloto al cual denominaremos "Chunal", se encuentra ubicado en las coordenadas lat: -11° 21' 39.60", Lon: -76° 27' 30.73", a 4400 msnm con una superficie aproximada de 16 ha. Figura 1 B

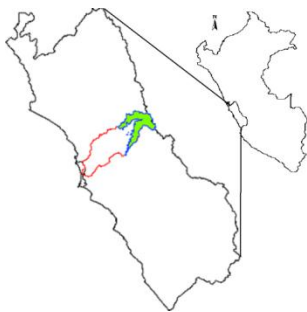


Figura 1. A) Área de estudio, cabecera de cuenca del río Chillón (en verde). B) bofedal piloto Chunal.

4 Resultados

Los trabajos previos para la detección de bofedales de la cuenca del río Chillón (Garcia et., al 2014, 2015) sentaron las bases para el uso del Linear Spectral Unmixing (LSU). Inicialmente se visualizó en RGB la cabecera de cuenca del río Chillón mediante las bandas **SWIR 2, NIR, RED** respectivamente, Figura 2, apreciando los bofedales, se seleccionó los Endmembers (EMs) que se utilizaron para la clasificación LSU, que fueron el EM bofedal, el EM roca y suelo. Figura 3. Una vez generado el mapeo de la cuenca según el LSU se obtuvo el mapa de bofedales de cabecera de cuenca del río Chillón Figura 4. Los valores de las fracciones endmember (FREM) para los píxeles que se encuentran al interior del bofedal fueron de 0.45 a 1, y la FREM roca y la FREM suelo, tienen el valor próximos a 0.

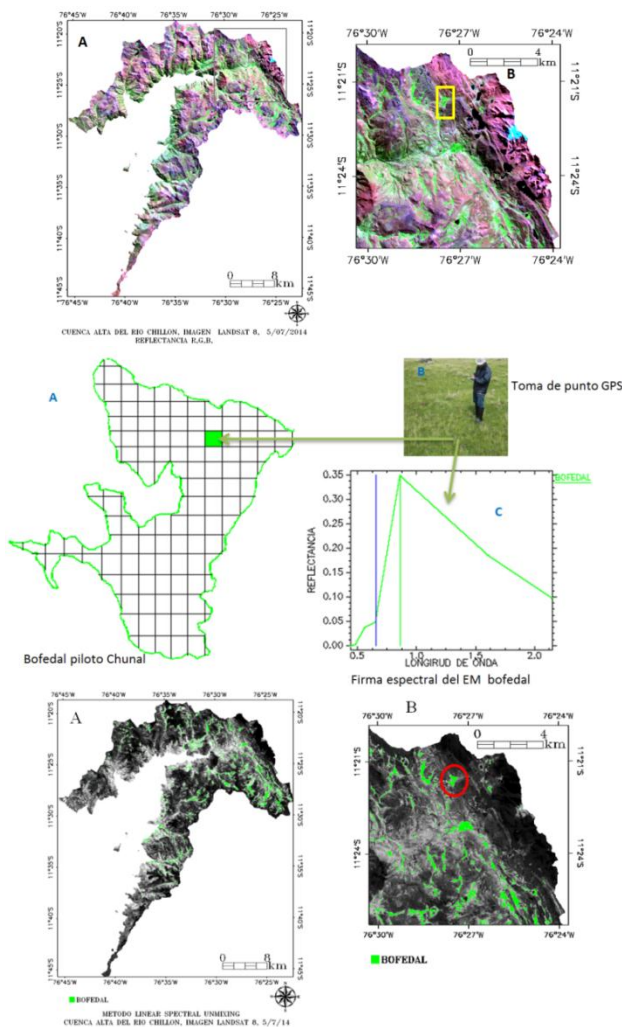


Figura 2.

- A) Cabecera de cuenca del río Chillón imagen en reflectancia, **SWIR 2 (R), NIR(G)**
- B) B) Zona de los trabajos de campo y bofedal piloto Chunal al interior de un rectángulo amarillo.

Figura 3.

- A) Se observa el bofedal piloto Chunal.
- B) Toma de punto GPS y
- C) Firma espectral homogénea correspondiente, EM bofedal.

Figura 4

- A) Mapa de bofedales de la cabecera de cuenca de río Chillón, método endmembers.
- B) Zona cercana a los trabajos de campo. Imagen Landsat 8 de fecha 5/7/2014.

También en trabajos sobre la detección de bofedales de la cuenca del río Chillón (Garcia et., al 2014, 2015) se usó un método basado en Índices. Se observó que los bofedales queda zonificados en color verde oscuro, azul oscuro, marrón para el NDVI; NDWI, NDII

respectivamente. Los rangos de distribución del NDVI que se obtuvieron para el bofedal piloto, está entre los 0.44 a 0.831, del NDWI -0.850 a -0.512y NDII 0.002 a 0.47, como se puede apreciar en las Figuras 5,6 y 7 estos índices permiten resaltar estos ecosistemas de forma separada.

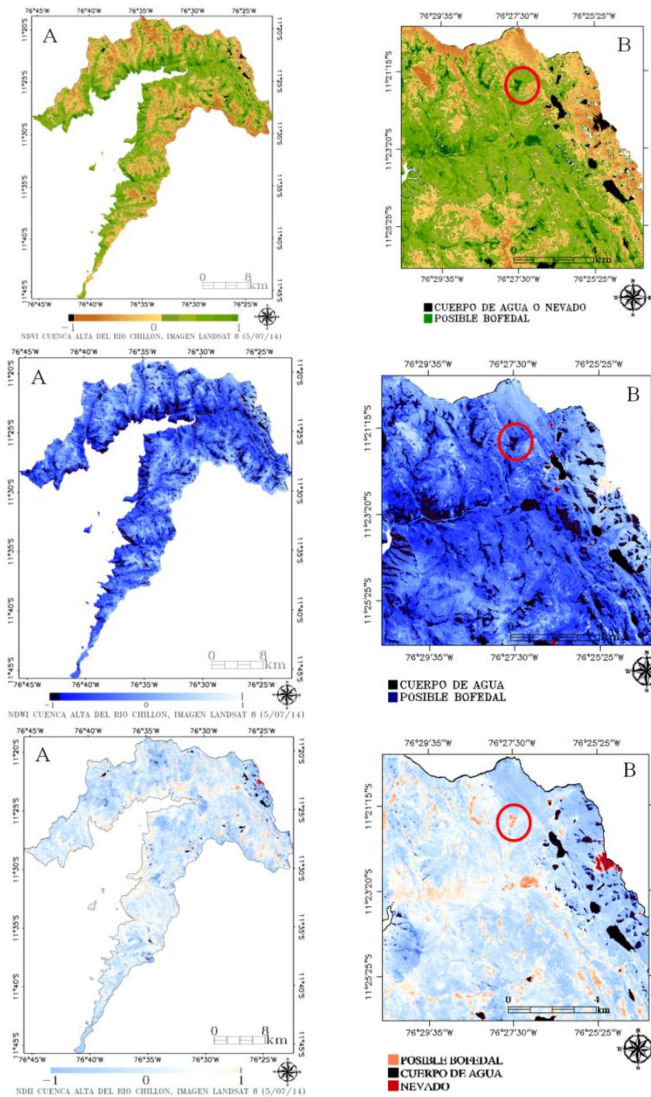


Figura 5.

- A) Distribución espacial de NDVI, cabecera de cuenca del río Chillón.
- B) Distribución espacial del NDVI, en la zona de estudio.

Figura 6.

- A) Distribución espacial del NDWI de la cabecera de cuenca del río Chillón.
- B) Distribución espacial del, NDWI de la zona de estudio

Figura 7.

- A) Distribución espacial del NDII, cabecera de cuenca del río Chillón.
- B) Distribución espacial del NDII de la zona de estudio

4.1 UNION DE AMBAS METODOLOGÍAS

Como el fin de simplificar y generar un índice de bofedal, de la metodología EM se tomó el valor de la fracción EM de bofedal, del método basado en índices se tomaron en cuenta los valores de los índices NDVI, NDWI y NDII solo de bofedales. Del mapa de bofedales se observa que para cada píxel que pertenece a la clase bofedal existen 4 variables importantes que han sido de utilidad para realizar el mapeo de bofedales; estas variables son: La FREM bofedal, los rangos del NDVI, NDWI y NDII para los bofedales. Posteriormente se analizaron la correlación existente entre la FREM bofedal con cada índice

4.2 CORRELACION ENTRE LA FRACCION ENDMEMBER BOFEDALY EL NDVI, NDWI, NDII PARA ÁREAS DE BOFEDALES

Con la finalidad de observar el nivel de correlación entre los valores de la fracción endmember de bofedales y el NDVI, NDWI Y NDII de los bofedales de la cabecera de cuenca del río Chillón se realizaron gráficas de dispersión de estos valores para cada pixel que de la clase bofedales, 23635 píxeles (Figura 8)

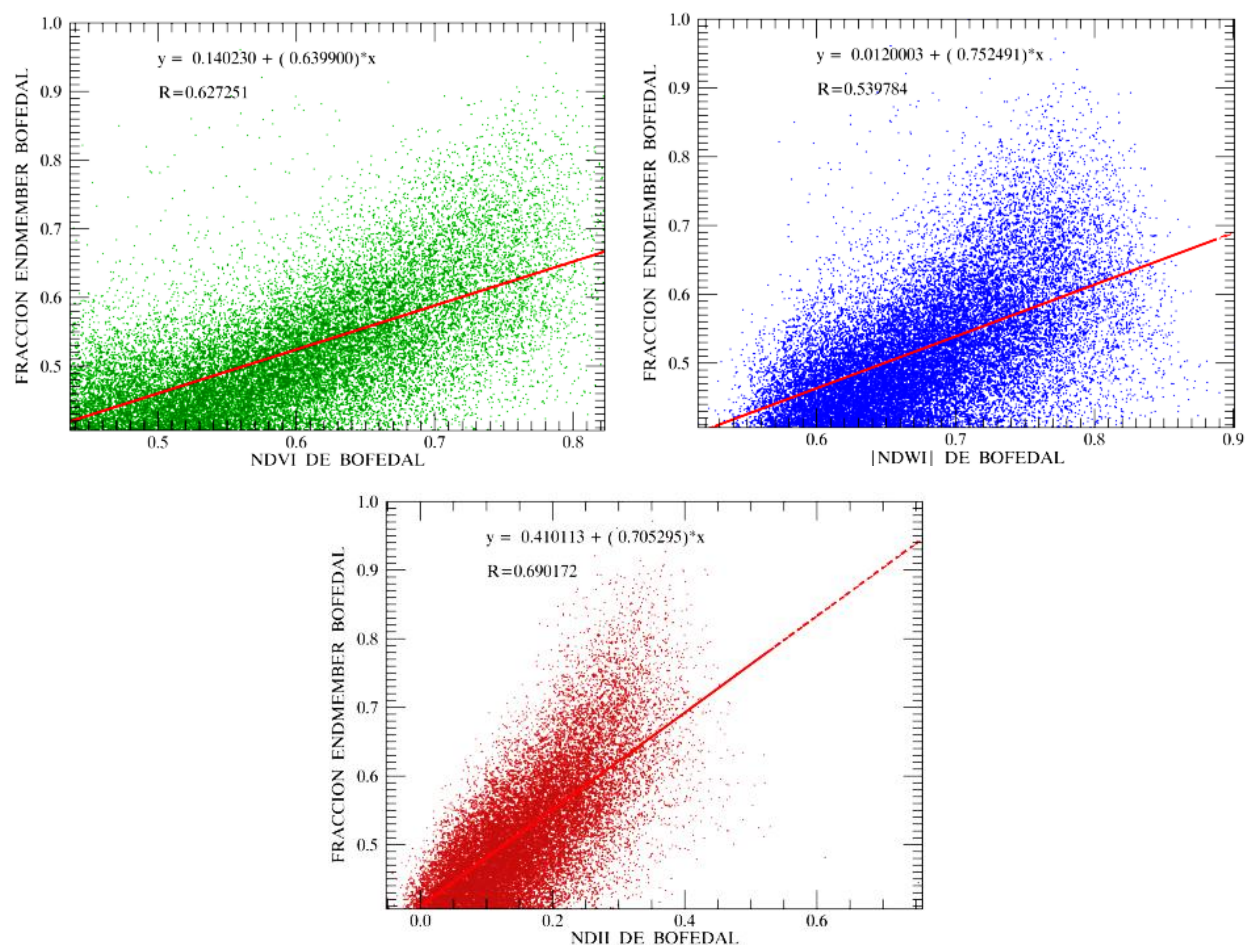


Figura 8. Gráficos de dispersión entre la fracción EM bofedal y el NDVI, NDWI y NDII de bofedales.

4.3 ELECCIÓN DE LOS INDICES

Basados en que el NDII de los bofedales tiene mayor correlación con la FREM que los otros índices, se eligió este índice como punto de partida para relacionarlo con uno de los otros dos índices y formular una expresión matemática entre ambas para que nos permita zonificar de forma más directa los bofedales. Luego de realizar múltiples expresiones y basados en los resultados que fueron corroborados en los trabajos de campo, se pudo obtener una expresión que relaciona dos índices en particular, uno de ellos NDII y el otro es NDWI, esta relación entre ambas zonificó de forma directa, proporcionando un mayor contraste de los bofedales de la cabecera de cuenca del río Chillón. Gracias a esta relación entre el NDII y al NDWI a continuación se propone un ÍNDICE DE BOFEDAL.

4.4 ÍNDICE DE BOFEDAL (IDB)

En base de todos los resultados anteriores se propone un índice de bofedal (IDB)

$$IDB = \frac{NDII - NDWI}{NDII + NDWI} \quad (1)$$

Desarrollando la ecuación 5.2 se puede expresar en función de las bandas ρ_{GREEN} , ρ_{NIR} y ρ_{SWIR} según:

$$IDB = \frac{(\rho_{NIR})^2 - (\rho_{GREEN} \times \rho_{SWIR})}{\rho_{NIR}(\rho_{GREEN} - \rho_{SWIR})} \quad (2)$$

4.5 GENERACIÓN DEL MAPA DEL BOFEDALES, METODO IDB.

Al aplicar la ecuación 5.3 a la imagen, que previamente se le realizado el preprocesamiento, y una corrección atmosférica con el modelo FLAASH, se observa que los bofedales están claramente zonificados en color negro entre los rangos de -3.5 a -1.15, según lo corrobora los trabajos de campo realizados, en la Figura 9 apreciamos el mapa de la cabecera de la cuenca del río Chillón en color negro

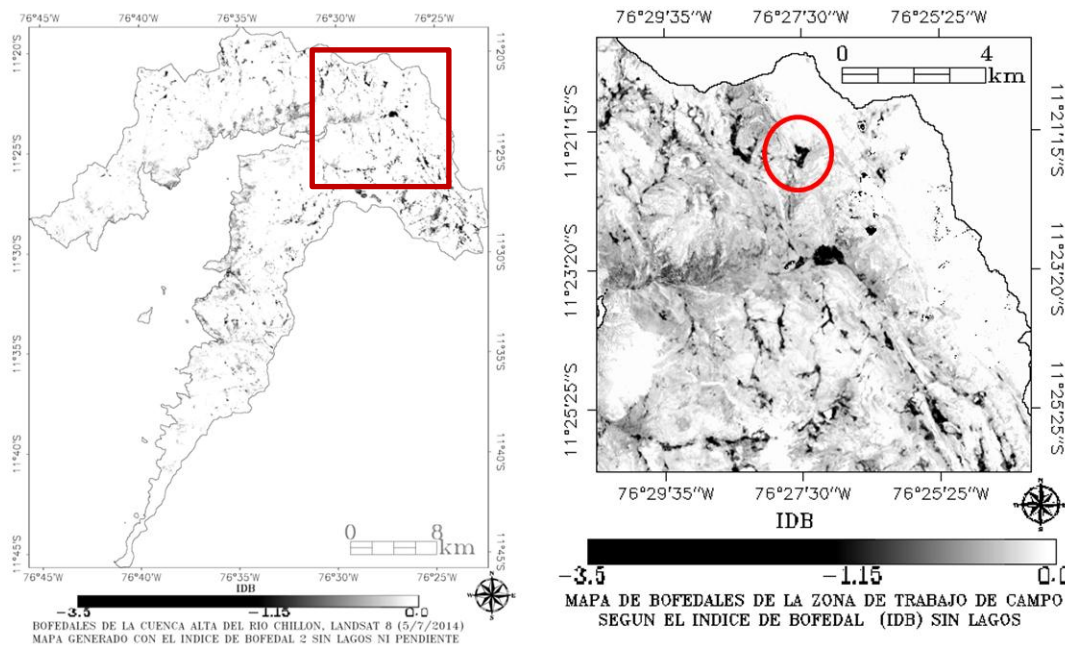


Figura 9. A) Mapa de bofedales por el método de IDB, cabecera de cuenca. B) Mapas de bofedales método IDF lugar cercano al trabajo de campo, se observa que las zonas oscuras corresponde a las áreas de los bofedales

4.6 VALIDACIÓN DEL ÍNDICE DE BOFEDAL

Luego de este mapa se han tomado 61 puntos que fue zonificado como bofedal, de los cuales 40 correspondientes a bofedales que se encuentran dispersados en toda la cuenca, 11 corresponde al bofedales cercanos al bofedal piloto Chunal, y otros 10 puntos muy pequeños zonas oscuras, luego de un previo análisis de gabinete. Con la imágenes del Google Earth se corroboran que 60 puntos corresponden a bofedales, esto representa un acierto de 98.36 % .Figura. 10

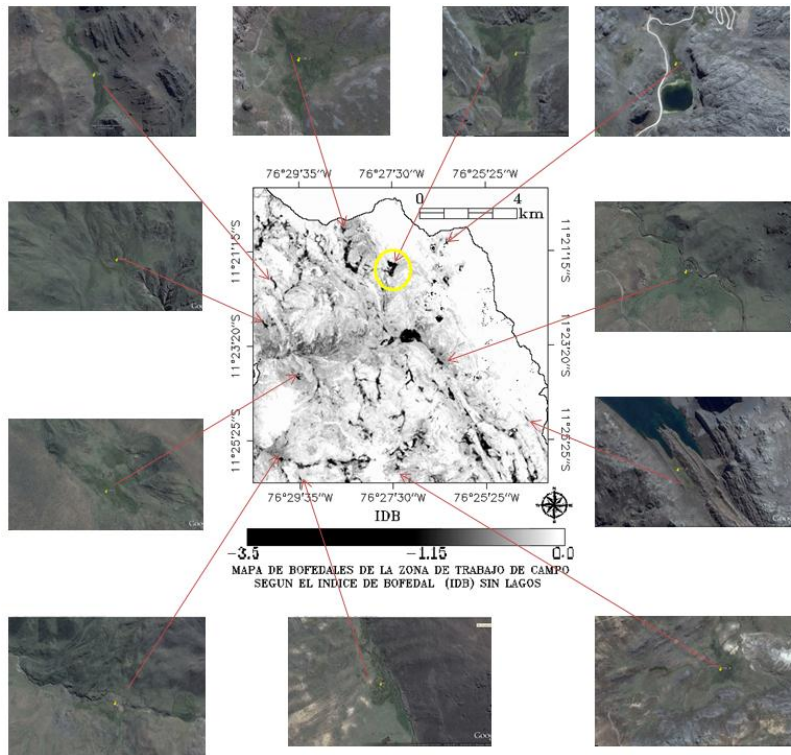


Figura 5.10. Validación del Mapa de bofedales generado por el IDB de la zona cercana al bofedal piloto.

4.7 Áreas de los bofedales para el periodo 1986 al 2016.

Siguiendo la ecuación 5.3 se generaron los mapas de bofedales, luego se calculó las áreas de los bofedales para el periodo 1986 al 2016 Figura 11, en la cual observamos que las áreas de los bofedales tienen un comportamiento dinámico, variando desde 890 has hasta 1897 has, la dinámica de estos procesos podría depender de procesos climáticos o antrópicos

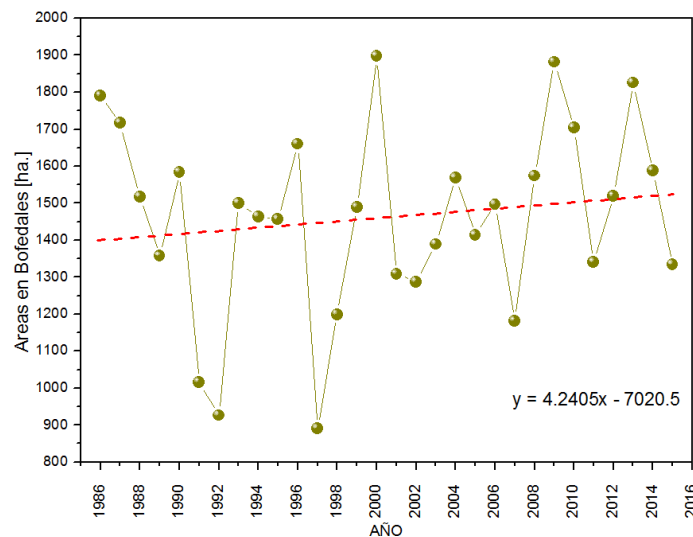


Figura. 11. Áreas totales de bofedales de la cabecera de cuenca del río Chillón a lo largo del tiempo periodo 1986 al 2016

5 CONCLUSIONES

El índice que representa mejor la fracción de endmember bofedal fue el NDII, mostrando una alta correlación con la fracción de bofedal del método *endmember*.

Basado en los resultados de las correlaciones entre la FREM y los índices, haciendo además una relación adecuada entre el NDII y el NDWI se pudo generar un IDB que zonifica de manera directa a los bofedales.

El IDB demostró ser un buen índice para el mapeo de bofedales siendo una herramienta rápida, sencilla y eficaz para el monitoreo de estos ecosistemas.

Las áreas de los bofedales de la cuenca del río Chillón presentan un comportamiento dinámico como se observa para el periodo 1986 al 2015

6 REFERENCIAS

Flores. D. (2002). “Identificación y análisis de cambios en bofedales de la cordillera occidental y del altiplano de Bolivia. Tesis Maestría Profesional en “Levantamiento de recursos hídricos”

García, J. L., y Willems, B. L. (2014). Estudio de los humedales de la cuenca alta del río Chillón usando datos imágenes del sensor TM a bordo del satélite Landsat 5: Avance. Encuentro Científico Internacional 2014 de invierno. Lima- Perú, 30 de julio – 1 de agosto del 2014

García, J. L., y Willems, B. L. (2014). Estudio del Bofedal Piloto, Chunal, para la propuesta de una Metodología para la Teledetección de Bofedales de la Cuenca Alta del río Chillón usando datos imágenes de los sensores TM y TM+ a bordo de los satélites Landsat. XXIII Simposio Peruano de Física, Cusco-Perú. 6-10 de Octubre de 2014,

García, J. L., y Willems, B. L. (2015). Metodología para el Estudio de Bofedales en Cabeceras de Cuenca Usando Datos Imágenes de los Sensores TM, OLI a bordo de los Satélites Landsat-Caso Estudio: Bofedal Chunal, Cuenca Alta del río Chillón.: Avances. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE

García, J. L., Willems, B. L. y Espinoza R. (2015). Caracterización de Suelos de Bofedales Alto Andinos, Caso Estudio: Bofedal Chunal, Cuenca Alta del río Chillón. XXIV SIMPOSIO PERUANO DE FÍSICA Lima-Perú. 02-06 de noviembre de 2015

Gil, E. (2011). Bofedal: Humedal altoandino de importancia para el desarrollo de la región Cusco. 1-10.

MINAM (2015) Memoria Descriptiva del Mapa de Cobertura Vegetal del Perú. Ministerio del Ambiente (MINAM), Lima, 77 pp.

Olarte N., Bertha. 2002. “Plan integral de gestión ambiental de residuos sólidos en el distrito de Carabayllo, Lima”. Tesis para optar el grado de magíster en ingeniería sanitaria y ambiental. Cali, Colombia: Universidad del Valle.

Prieto G. Laura J. Luna D, Laguna S. (2001). Características y distribución de los bofedales en el ámbito boliviano del sistema T.D.P.S. 1era ed. Editorial Plural. Editores. La Paz