
Dinámica de los bofedales en el altiplano peruano-boliviano.

Zorogastúa-Cruz, P.^{1,2*}, R. Quiroz¹ y J. Garatuza-Payan³

¹ División de Sistemas de Producción y Ambiente. Centro Internacional de la Papa (CIP) Lima, Perú.

² Facultad Agronomía, Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Lima Perú.

³ Ciencias del Agua y del Medio Ambiente. Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON), Ciudad Obregón, Sonora. México

Peat bogs Dynamics in the Peruvian Bolivian High Plateau.

Abstract

Land Cover and Land Use, spatial working scale, aboveground biomass and areas under peat bogs (bofedales) in the Peruvian Bolivian Altiplano were assessed through annual and multiannual NDVI variations. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) from AVHRR – NOAA.11, MSS and TM LANDSAT 2 and 5 and HRV SPOT 4 and 5 (VEGETATION 1 - 2 products), was the main variable of analysis. AVHRR NOAA satellite Imageries were used for discriminating and quantifying areas of Water bodies, Totoral (reeds), Cropland, Salt/Barren Lands, Tolar bushes /Tall grassland, Grassland (< 33% cover)/ Short grass prairie, salt grass, Tall grassland, Intensive use Grassland/ Cropland and peat bogs (Bofedales). Scale dependency of NDVI data from TM LANDSAT 5 images was made showing that bofedal ecosystem should be studied at resolutions up to 120 meters. NDVI from AVHRR NOAA imageries was related with the aboveground biomass dry matter values and the relationship $\text{Dry Matter} = 1.615 * (\text{NDVI})^{1.318}$ was obtained. NDVI changes during the studied time explained 90% of variation of green dry matter. According to NDVI behaviour obtained from SPOT Vegetation imageries, at qualitative level, peat bogs showed capability of biomass restoration, however, with the higher detail shown by MSS and TM Landsat 2 and 5 images, decrease in area through time was observed and thus less biomass and water holding capacity in this ecosystem.

Key words: Land cover & land use, Grasslands biomass, Peatbogs, Working scale, Remote sensing.

Resumen

Se evaluaron las variables Cobertura y Uso de la Tierra, biomasa aérea, escala espacial de trabajo y el área del ecosistema de bofedales a dos resoluciones espaciales en el altiplano Peruano-Boliviano a través de la variación anual y multianual del NDVI y la biomasa aérea de estos pastizales. El Índice de la Diferencia Normalizada de la Vegetación (NDVI) de imágenes AVHRR del satélite NOAA 11, 12 y 14; MSS y TM de los satélites LANDSAT 2 y 5 y el HRV del satélite SPOT 4 y 5 (producto VEGETATION 1 y 2), constituyó la principal variable de análisis. Las imágenes del AVHRR NOAA fueron usadas para discriminar y cuantificar las áreas de Cuerpos de agua, Totoral, Tierras de cultivo, Salar/suelo desnudo, Tolar /pajonal, Pastos (< 33% cobertura)/ Gramadal, Pastos porte bajo, Pajonal, Pastos de uso intensivo / tierra de cultivo y Bofedales. El análisis a diferentes escalas espaciales del NDVI obtenido de imágenes TM LANDSAT 5 mostró que los bofedales deben ser estudiados a resoluciones menores o iguales a 120 m. A 30 m de resolución, se tuvo 127110 ha de bofedales, 62% de las 206431 ha obtenidas a 1 km de resolución.

La relación del NDVI de imágenes AVHRR NOAA 11 y la biomasa vegetal aérea establecida fue: $\text{Materia Seca} = 1.615 * (\text{NDVI})^{1.318}$. Los cambios en el NDVI, durante el período estudiado, explicaron el 90% de la variación de la materia seca verde. De acuerdo al comportamiento del NDVI obtenido de imágenes SPOT 4 - 5 Vegetation 1-2, a nivel cualitativo, los bofedales muestran capacidad de recuperación de la biomasa, sin embargo, con escenas del LANDSAT 2 (MSS) y 5 (TM), a mayor detalle, se observa disminución del área, en consecuencia de la biomasa y la capacidad de regulación hídrica de este ecosistema.

*Autores de correspondencia
Email: p.zorogastua@cgiar.org

Palabras clave: cobertura y uso de la tierra, producción primaria pastizales, bofedales, escala de trabajo, percepción remota.

Introducción

Los bofedales constituyen los ecosistemas de pastizales más importantes en las zonas áridas y semiáridas del altiplano peruano boliviano, zona que se encuentra sobre los 3800 msnm. Proporcionan varios servicios ambientales como el de regulación del ciclo del agua y protección del suelo. Poseen grandes reservas de carbono y tienen una alta productividad, proveyendo de pastos frescos en cantidad y de buena calidad para la crianza del ganado, principal actividad de la zona. Este ecosistema sustenta a la mayor parte de los camélidos sudamericanos, especialmente alpacas y constituyen parte de la belleza escénica del paisaje. El Altiplano se halla al Sudeste del Perú y la zona contigua de Bolivia, región comprendida entre los paralelos 14°28' y 19°55' Sur y los meridianos 66°15' y 70°40' Oeste. Las temperaturas máximas promedios multianuales llegan a 17°C y las mínimas a -5°C. La precipitación disminuye de norte a sur desde 700 mm hasta 350 mm, siendo más húmeda la zona que circunda al Lago Titicaca y la parte norte de la cuenca.

La población actual del Altiplano se estima en 1.32 millones de habitantes en el lado peruano (INEI, 2008) y una cantidad similar en el boliviano (INE, 2009). Entre el 60 y el 70% de la población total de la región se encuentra en situación de pobreza (PNUMA, 1996; INE, 2009 e INEI, 2010) gran parte de ella, vive en las zonas altas de la cuenca.

La principal actividad productiva de la región es la ganadería, basada en los pastizales nativos. El sobrepastoreo y las actividades productivo-extractivas de las poblaciones locales tienen generalmente un impacto negativo sobre la vegetación, los suelos y el agua (Swinton y Quiroz, 2003). Un ecosistema abundante en la región es el de bofedales, que son áreas de suelos húmedos con un alto contenido de materia orgánica (ONERN, 1965, 1982; INRENA, 1996; Moreau and Toan, 2003; Silvius *et al.*, 2008 y Segnini *et al.*, 2010). Estos bofedales o vegetación de turbera (Ruiz y Tapia, 1987) presentan una composición florística rica en juncáceas y gramíneas en la que las especies dominantes pertenecen a los géneros *Distichia*, *Carex*, *Calamagrostis*, *Gentiana*, *Werneria*,

Arenaria, *Hypsela*, *Alchemilla*, *Ranunculus*, *Lilaeopsis*, *Lucilia*, *Diplophylla*, *Chevreulia*, *Plantago* y otros. Estas asociaciones son de buena palatabilidad, alto valor nutricional y mantienen vegetación verde durante todo el año, lo que permite que sostengan la producción de camélidos y ovinos con una carga animal 5 a 8 veces superior (8 a 12 unidades ovino por ha año⁻¹) a la de los pastizales vecinos sujetos a periodos de déficit de humedad durante la estación seca (Ruiz y Tapia, 1987 y Florez, 1993). La vegetación de los bofedales es postrada y forma densa almohadillas que reducen la compactación del suelo causada por el pastoreo.

A pesar de la importancia y lo que está ocurriendo con los bofedales, no existe una cuantificación y se precisa realizar el seguimiento y evaluar la dinámica de este ecosistema que aparenta estar en riesgo de desaparición. Aunque la opinión de los expertos es que los bofedales están en retroceso, no hay una evidencia cuantitativa que respalde esta opinión. El presente trabajo fue planteado para estudiar la viabilidad de utilizar la percepción remota para cuantificar las áreas en bofedales, con los siguientes objetivos específicos:

Determinar la cobertura y el uso de la tierra en el altiplano, para cuantificar la proporción de bofedales, utilizando imágenes AVHRR NOAA.

Estimar la productividad primaria a partir de valores del Índice de la Diferencia Normalizada de la Vegetación y su relación con la biomasa aérea.

Evaluar la escala a la que deben ser estudiados los bofedales.

Determinar la superficie de bofedales con imágenes TM LANDSAT.

Percepción Remota

La percepción remota de la cobertura vegetal mediante sensores aéreos o satelitales amplía la cobertura espacial y temporal de observaciones de los procesos ecológicos, hidrológicos y biogeoquímicos en una determinada región. Estas observaciones guardan una estrecha correlación con las observaciones campo (Okin y Roberts, 2004). Los satélites NOAA-AVHRR y SPOT VEGETATION, productos con cobertura sinóptica y alta resolución temporal, son de libre disponibilidad en la Web. Estas características, las

hacen herramientas útiles para el estudio de la dinámica de la vegetación (Tucker, 1979), la estimación de su biomasa, porcentaje de cobertura verde, producción de biomasa verde, dinámica de la vegetación, entre otros (Price, 1992; Tucker y Sellers, 1986; Prince y Tucker, 1986; Diallo *et al.*, 1991; Hobbs, 1995), así como determinar su fenología, e índice de Área Foliar (Justice *et al.*, 1985; Townshend and Justice, 1986). Estos estudios se basan en el uso de indicadores de la vegetación como el Índice de la Diferencia Normalizada de la Vegetación (NDVI). El algoritmo NDVI (Kriegler *et al.*, 1969) es una proporción que resulta de sustraer los valores de la reflectancia en la banda roja de los de la banda infrarroja cercana y dividir esta diferencia entre la suma de los mismos valores $[\text{NDVI} = (\text{IR-R})/(\text{IR+R})]$. El NDVI se deriva de los registros del sensor Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución (AVHRR), que está en el satélite de NOAA (Eidenshink y Faundeen, 1994). Con el NDVI se obtiene una clara señal de la vegetación, que contrasta con la originada por el suelo subyacente (Tucker and Sellers 1986). La alta absorción de la radiación del espectro electromagnético por la clorofila en el rojo (600 – 700 nm) y la fuerte reflectancia en el infrarrojo cercano (700– 350 nm) resaltan las variaciones que ocurren en la vegetación y permiten diferenciar especies u obtener información de la condición en la que se encuentran a través de sus firmas espectrales (Knipling, 1970) y características de ellas, como la biomasa y el vigor de las plantas. El NDVI, cuando se calibra con muestreos de biomasa herbácea en campo, sirve para estimar la producción primaria y planear estrategias de pastoreo (Medina *et al.*, 2009).

El uso de imágenes AVHRR-NOAA se ha generalizado debido a la alta resolución temporal que ofrecen. Los datos desde Abril de 1992 hasta Mayo de 1996 son de libre disposición. Tienen una cobertura de toda la tierra, con escenas de un tamaño de 2400 x 2400 km con píxeles de 1.1 km de lado, en 5 bandas del espectro electromagnético que incluyen las bandas visibles e infrarrojas (NOAA, 1998). Estas imágenes se utilizan para realizar estudios a escala global o regional de la cobertura vegetal (Defries and Townshend, 1994). También sirven para clasificar la vegetación (Lobo *et al.*, 1997) y estimar estadísticas agrícolas (Walker y Mallawaarachchi, 1998).

Las imágenes son transformadas primero en NDVI

y luego, con base en los valores máximos de NDVI en ellas, se construyen imágenes compuestas de periodos de 10 a 30 días a fin de reducir la cobertura de nubes, humo u otros aerosoles atmosféricos (Cihlar, 1996).

Materiales y método

Las bandas utilizadas para calcular el NDVI fueron tomadas de imágenes AVHRR -NOAA 11 de Octubre de 1992 a Setiembre de 1993, obtenidas del USGS (USGS, 2005). Las bandas compuestas mensuales del NDVI fueron corregidas geoméricamente utilizando 20 puntos localizados en la costa sur del Perú y el litoral del lago Titicaca, y fueron tomados de las cartas fotogramétricas de Perú y Bolivia a las escalas 1:100000 y 1:250000. El área del Altiplano fue delimitada con una máscara bitmap.

Inicialmente se realizó una clasificación no supervisada para la Cobertura y el uso de la tierra con 12 clases, las que fueron obtenidas a partir del agrupamiento de píxeles que tienen valores digitales de brillo próximos. El mapa se utilizó para el trabajo inicial de campo, el cual se basó en 60 transectos de 20 metros de largo y 5 de ancho, perpendiculares a las principales vías de acceso a la zona. El muestreo de las coberturas y usos de la tierra en el campo, se realizó localizando los puntos con la ayuda de un Sistema de Posicionamiento Global (GPS).

Esta data fue utilizada para generar mapas de cobertura y uso de la tierra, a través de una clasificación supervisada, localizando las muestras en la imagen digital, construyendo polígonos con píxeles que tenían semejanza espectral, se extrajeron los valores del NDVI para cada mes y se utilizaron para construir los patrones espectrales temporales para cada cobertura y uso de la tierra.

Para obtener la biomasa de los bofedales, se utilizaron los datos colectados en el experimento reportado por Moreau y Toan (2003) donde se realizó el corte de la parte aérea, de 100 muestras al azar con anillos de 0.357 m de diámetro y secadas a 60°C por 2 días y el posterior pesado de las muestras. El muestreo se hizo en cada uno de los principales estadios fenológicos de la vegetación.

Como la data georeferenciada disponible correspondía a 1996, 1997 y 1998, se seleccionaron escenas del AVHRR – NOAA 12 y 14 de tales años. La información se utilizó para localizar en las

imágenes, los píxeles en que se hizo el muestreo de biomasa, para cada una de las coberturas y usos de la tierra. Posteriormente se establecieron las relaciones funcionales entre el NDVI y la materia seca, información que se utilizó para invertir los valores de las imágenes AVHRR-NOAA mensuales del NDVI de octubre de 1992 a Setiembre de 1993 y así obtener la distribución espacial y temporal de la biomasa aérea.

La evaluación cualitativa de la resiliencia de los bofedales, se realizó a través del análisis de la variación de los valores del NDVI de los pastizales a través de las curvas de crecimiento para cada categoría de cobertura y uso de la tierra, obtenidas a partir de muestras de píxeles de imágenes del NDVI de 196 escenas decadales registradas entre Abril de 1998 y Setiembre de 2003 por el sensor HRV del satélite SPOT 4-VEGETATION 1 (VEGETATION, 2009).

Para la determinación de las escalas de trabajo, se utilizó la agregación de los valores digitales del NDVI de dos imágenes registradas en la estación seca por el Mapeador Temático del satélite LANDSAT 5 que tenían bofedales y otros pastizales. Los píxeles fueron agregados de 30 a 60, 120, 240 y 480 metros y se calcularon las varianzas totales para cada nivel de resolución (De Cola, 1997)

La Clasificación de bofedales a mayor resolución fue realizada utilizando la banda 4 del Mosaico de Imágenes en formato Mr. SID (30 metros de resolución) constituidos por las bandas 7, 4 y 2 de imágenes registradas entre 1990 y 2002 por el Mapeador Temático (TM) del satélite LANDSAT. Para hacer comparables las imágenes que conforman el mosaico, se estandarizaron los valores de NDVI transformándolos a valores de Z de acuerdo a la Ecuación 1

$$Z = (X_i - \bar{X}) / S_x \quad (1)$$

en donde:

X_i : Valor del Píxel

\bar{X} : Promedio de los valores

S_x : Desviación estándar de los valores

Posteriormente, los valores obtenidos fueron clasificados en valores discretos de Z a través de la función Rangos de densidad (Density Slice) del programa ENVI.

En el mosaico del altiplano en formato Mr. SID (NASA, 2008) se utilizó un sistema de clasificación analógico digital, identificando muestras de los bofedales en los cuales se aplicó la función de inclusión de los píxeles adyacentes a los muestreados (grow) del programa ENVI. Esta inclusión usa los valores promedio más dos desviaciones estándares. También se utilizó el criterio de ubicación de zonas planas, a través de la elaboración del mapa de las pendientes, derivado del Modelo Digital de elevación de 30 m de resolución espacial (ASTER DEM, 2009).

A fin de evaluar las variaciones de las áreas de los bofedales a un mayor nivel de detalle, se hizo una clasificación analógico digital del área entre Huarina y Batallas, Bolivia, similar a la realizada con el Mosaico en formato Mr. SID. Los valores del NDVI fueron obtenidos a partir de las imágenes registradas por el barredor multiespectral (MSS) de los satélites LANDSAT 2 del 25 /10/1975 y 30/07/1986 y LANDSAT 5 TM del 30/07/ 1989 y el 02/11/2007, las cuales fueron sometidas previamente a una corrección atmosférica, utilizando la técnica de sustracción de objetos oscuros (Chávez, 1996), en este caso, utilizando píxeles del agua del lago Titicaca.

Resultados y discusión

Las firmas espectrales multitemporales del NDVI y el mapa de la cobertura y el uso de la tierra derivado de ellas, se presentan en las figuras 1 y 2

La determinación y cuantificación de los diferentes usos de la tierra en la zona de estudio se muestran en el cuadro 1 y en la figura 2. Más del 90% de la tierra en el Altiplano está cubierta por praderas naturales. La distribución de la vegetación en el año está explicada en gran parte por la disponibilidad de la humedad, por efecto de la precipitación y la proximidad del lago Titicaca cuya masa de agua modifica las condiciones térmicas y de evapotranspiración en la zona circunlacustre. Como resultado, la zona con esta influencia, presenta una vegetación de mejor calidad o mayor cobertura y biomasa. A medida que nos alejamos de esta zona, la vegetación dependiente de la lluvia es menos densa y produce menos biomasa herbácea, por la disminución en la humedad relativa y, en menor grado, por la configuración topográfica del área. Cada tipo de asociación vegetal tiene su dinámica

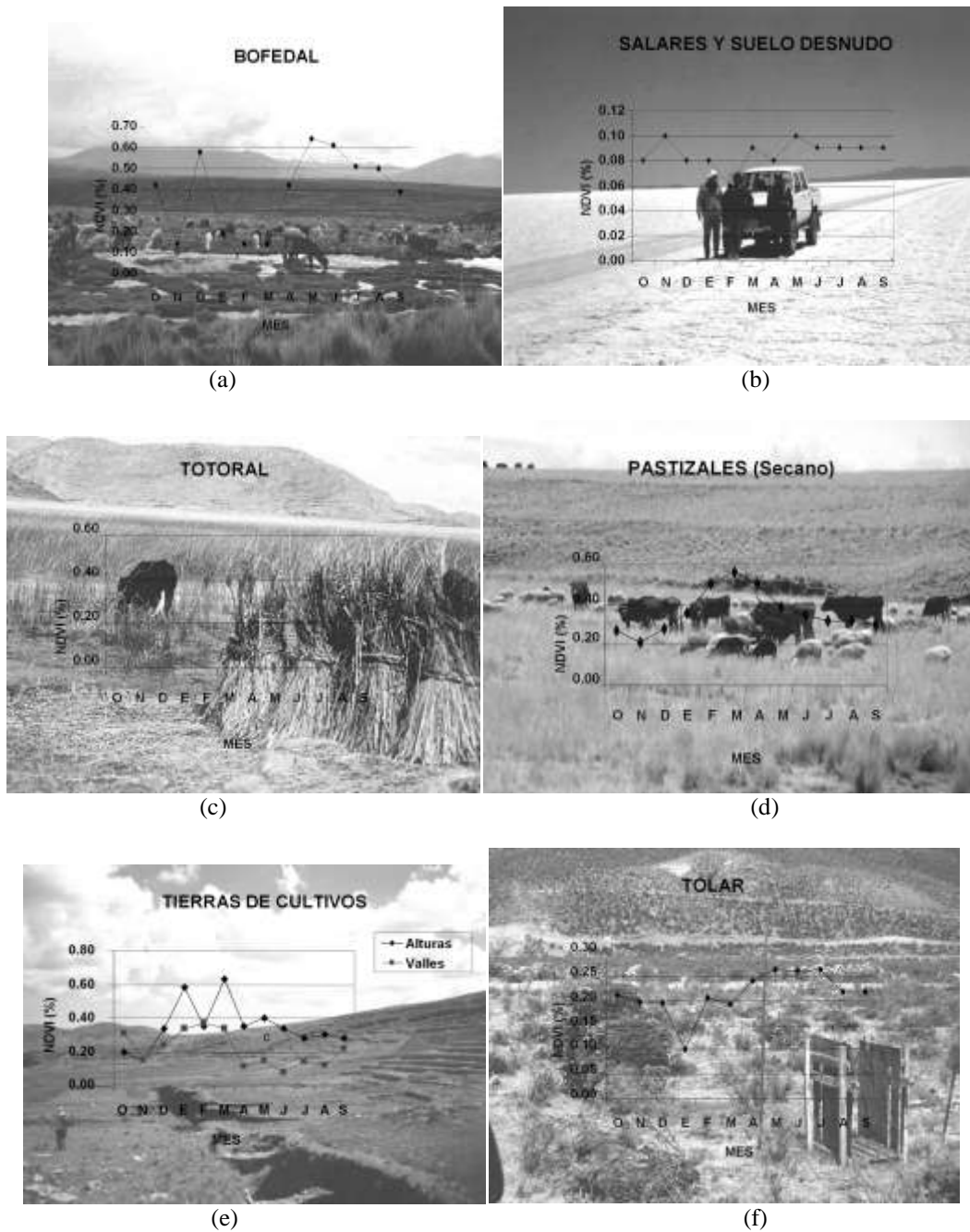


Figura 1. Dinámica anual de la Cobertura y Usos de las tierras en el Altiplano (a) Bofedal, b) Salar, c) Totoral, d) Pastizales (secano), e) Tierras de cultivo y f) Tolares.

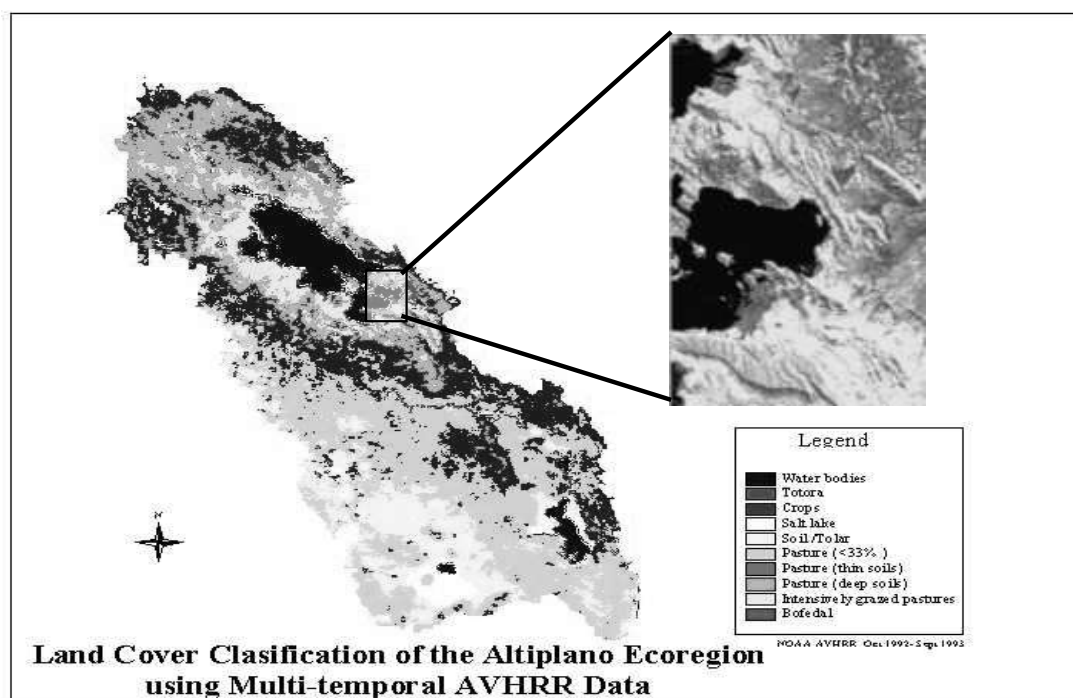


Figura 2. Clasificación de la Cobertura y el Uso de la Tierra del altiplano Peruano Boliviano en base al NDVI del AVHRR-NOAA 11, 1992-1993.

Cuadro 1. Resultados de la clasificación supervisada del NDVI obtenido de imágenes AVHRR-NOAA entre Octubre 1992 y Setiembre 1993

Categoría	Hectáreas	Porcentaje
Cuerpos de agua	928 006	6.3
Totoral	118 577	0.8
Tierra de cultivo	53 983	0.4
Salar/Suelo desnudo	368 561	2.5
Tolar/Pajonal	1 902 726	12.9
Patos (<33%), Gramadal	4 604 063	31.1
Pastos porte bajo	3 320 652	22.5
Pajonal	2 338 244	15.8
Pastos uso intensivo/ T. cultivo	941 887	6.4
Bofedal	206 431	1.4
Total	14 783 231	100

característica, la que se describe a continuación. Las pasturas de secano de diferentes tipos, son las asociaciones vegetales predominantes. Le siguen en importancia las asociaciones de pajonales con matorrales llamados tolares y las praderas de alta productividad, formadas por especies pratenses cultivadas. Los bofedales detectados a esta resolución espacial cubren menos del 2% del área total.

Los bofedales, compuestos principalmente por la

especie *Distichia muscoides*, muestran un menor impacto a lo largo del tiempo, aun cuando a lo largo de un año, sobre todo en épocas de escasez de pastos, son utilizados en forma intensiva.

Los tolares, constituidos principalmente por especies arbustivas de los géneros *Parastrephia* y *Baccharis*, tienen un rol fundamental en las zonas áridas y semiáridas. Esta asociación vegetal crea, por un lado, un microclima favorable a la vegetación herbácea que se desarrolla a la sombra

de ella; por otro lado, está sufriendo el mayor impacto por la extracción de este recurso para utilizarlo como combustible. Como consecuencia de esta extracción, los suelos que las sustentan, inician un acelerado proceso de degradación por salinización y el reemplazo de los tolares por la sucesión vegetal natural, constituida principalmente por la grama salada (*Distichlis humilis*).

Otras coberturas que siguen en orden de importancia, son las áreas de pastoreo intensivo / cultivos, el pajonal (*Festuca* spp y *Stipa* spp) y las gramíneas de porte bajo (*Muheblembergia* spp), que son las que han presentado mayor cantidad de material verde en el periodo evaluado, en comparación con los gramadales y los tolares. La discriminación de las clases alcanzó el acierto de 60% para los bofedales, 75% para los pastizales y tolares, y 100% para los suelos desnudos, salares y cuerpos de agua.

Determinación de la Escala Espacial para Estudiar los Bofedales

El análisis a través de las escalas espaciales y su impacto en la varianza (De Cola, 1997), mostró que los bofedales deben ser estudiados a resoluciones menores o iguales a 120 m ya que en este punto la variabilidad se minimiza (Figura 3). A mayores escalas espaciales se pierde la capacidad de definir los límites de este ecosistema y se corre el riesgo de

sobre o subestimar el área real.

La evidencia empírica sugiere que cuando la estimación de bordes geográficos se hace con instrumentos más finos de medición, la precisión de la estimación es mayor (Mandelbrot, 1967). Por ello, coberturas naturales de la tierra, de alto valor productivo como los bofedales, deben ser analizadas a resoluciones espaciales más finas para así determinar, con mayor precisión, el área real. El área cubierta por bofedales se analizó con imágenes en formato Mr. SID con pixeles de 30 metros; (Figura 4), que da una imagen detallada de los bofedales, pero el costo aumentaría si se utilizan imágenes en venta de mayor resolución, cuyo uso se justifica para el estudio detallado de zonas donde la existencia de estas asociaciones vegetales sea de alta incidencia e importancia.

El área cubierta por los bofedales hasta el año 2002 es de aproximadamente 127 110 ha de acuerdo a la clasificación hecha en el mosaico en formato Mr. SID (Figura 4), cifra menor a las 206 431 ha. mostrada en el cuadro 1 debido a que a la resolución de 1.21 km² de las imágenes del AVHRR NOAA, se identifican las principales áreas con este ecosistema, sin embargo, se ha perdido la capacidad para definir los límites del mismo y existe una mayor confusión con otros pastos, sobre todo en la estación húmeda.

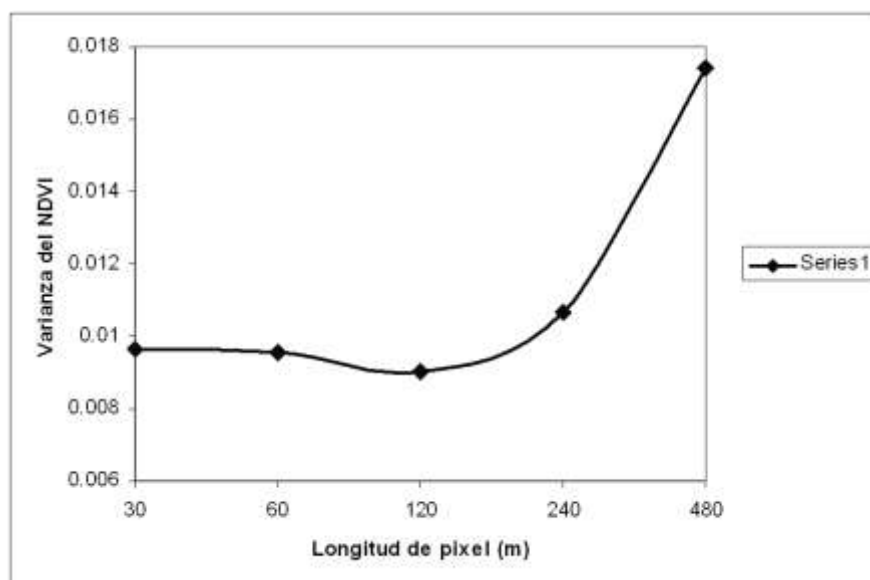


Figura 3. Escala de trabajo para estimar áreas en bofedales.

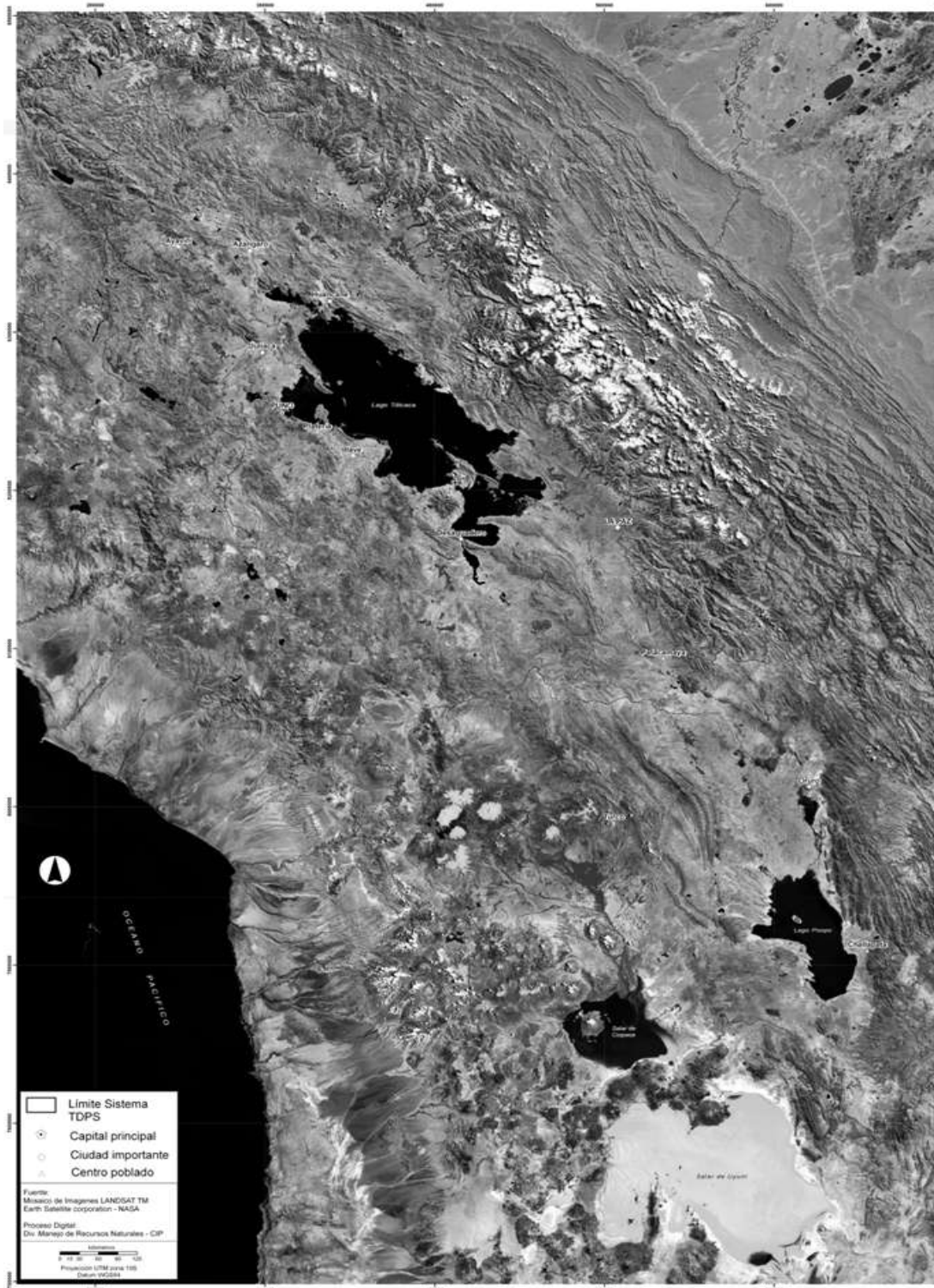


Figura 4. Distribución de los bofedales en el altiplano Peruano Boliviano

Dinámica de la Productividad Primaria

La relación matemática entre la materia seca verde y el NDVI de las asociaciones vegetales del Altiplano que se ajustó mejor, fue la de potencias (Ecuación 2). Los cambios en el NDVI, durante el período estudiado, explicaron el 90% de la variación de la materia seca verde para las fechas en que se registraron las escenas por el satélite.

$$\text{Materia Seca} = 1.615 * (\text{NDVI})^{1.318} \quad R^2 = 0.90 \quad (2)$$

Como resultado de la inversión de los valores del NDVI de las imágenes AVHRR de Octubre de 1992 a Setiembre de 1993, se estimó la distribución espacial de la biomasa en el Altiplano (Figura 5). Los bofedales presentan una mayor disponibilidad de biomasa a lo largo del año y con una mayor variabilidad en la época seca, por el pastoreo que se realiza en esa estación (Figura 6 (d)). En el año 2000 se presentó una sequía con lo que disminuyó en casi un 40% la disponibilidad de pasto, en el 2002 fue más drástica la disminución ya que fue menor en casi un 60% aumentando al 2003, con alta variabilidad en los últimos meses de ese año. El año 2002 la tendencia que muestra toda la vegetación y sobre todo la de secano, es la de haber sufrido impactos desfavorables, manifestado por la disminución de la producción de biomasa total, como lo indica la disminución del NDVI, sin embargo, los bofedales persistieron, aun cuando disminuyó su nivel productivo, como se observa en las figuras 4, 5 y 6.

El recurso forrajero en el Altiplano es muy dinámico y es afectado por el pastoreo itinerante por bovinos, ovinos y camélidos sudamericanos (llamas, alpacas y vicuñas), criados en forma extensiva. Como es de esperarse, la mayor defoliación se produce en las asociaciones más palatables para el ganado, como los bofedales, que son utilizados intensivamente en la época seca, en la cual no hay pastizales verdes de secano.

Un hecho que corrobora las observaciones de los valores digitales del NDVI en la escena AVHRR – NOAA es la comprobación en el campo de la presencia de abundante biomasa entre diciembre y mayo, siendo marzo el mes de mayor disponibilidad de materia seca. Estos meses corresponden a la época de lluvias mientras que entre Junio y Noviembre, periodo correspondiente a la estación seca, la biomasa disminuye ostensiblemente (Fig.5).

Las variaciones de las áreas de bofedales a nivel local, mostradas por el procesamiento de las escenas LANDSAT del área de Huarina-Batallas en Bolivia, correspondientes a una fecha para cada uno de los años 1975, 1896, 1989 y 2007, muestra que el área está sufriendo la disminución de cantidad y calidad de la cobertura vegetal en general y de los bofedales en particular (Figura 7). Si bien es cierto que anualmente se llega a tener el mismo pico de valores de NDVI, la amplitud de disponibilidad de materia verde ha ido disminuyendo, tal como se aprecia en la Figura 6. Esto se puede deber a una mayor presión de pastoreo sobre los pastizales cuando se presentan sequías. La razón de esto es por la variabilidad climática que trae probables alteraciones en los regímenes hídricos, con una menor disponibilidad de agua por la disminución en la precipitación y variaciones en el régimen térmico, con mayor presencia de heladas, lo cual afecta la disponibilidad de pastos en la estación seca y de agua en las partes altas que les provee de este recurso y en las partes bajas adyacentes a ellos, áreas a las cuales abastecen de agua.

Conclusiones

Es posible determinar la distribución espacial y temporal y el volumen de la biomasa en una región mediante el análisis de las imágenes registradas por el AVHRR-NOAA.

La determinación de biomasa puede ser realizada a través del NDVI calculado a partir de las bandas roja e infrarroja cercana, obtenidas de escenas AVHRR y VEGETATION, registradas por los satélites NOAA y SPOT respectivamente.

Los pastizales que presentan una mayor disponibilidad temporal de material verde son los de los bofedales, las áreas de pastoreo intensivo circunlacustre/cultivos, el pajonal, las gramíneas de porte bajo, los gramadales y los tolares.

La relación funcional entre los valores de materia seca y el NDVI hallada fue: $\text{Materia Seca} = 1.615 * (\text{NDVI})^{1.318}$ presentando ambas variables un alto coeficiente de determinación ($R^2 = 0.90$).

El uso de esta tecnología permite la comparación de la productividad primaria a lo largo de regiones extensas.

Los bofedales deben ser estudiados a resoluciones espaciales menores o iguales a píxeles de 120 metros en cada lado, para obtener medidas más precisas del área.

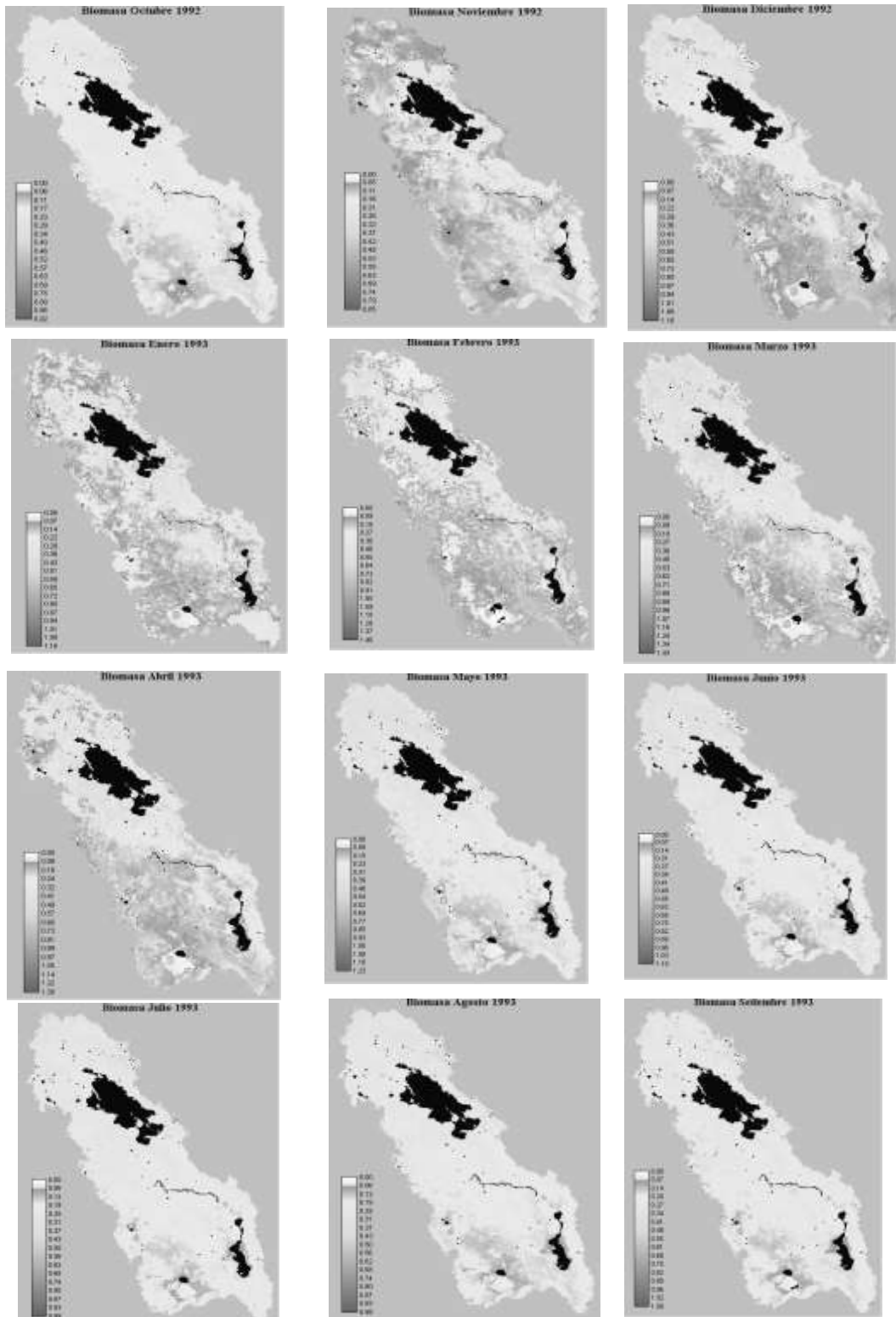


Figura 5. Biomasa temporal obtenida a partir de escenas AVHRR NOAA 11 (Octubre 1992 – Setiembre 1993).

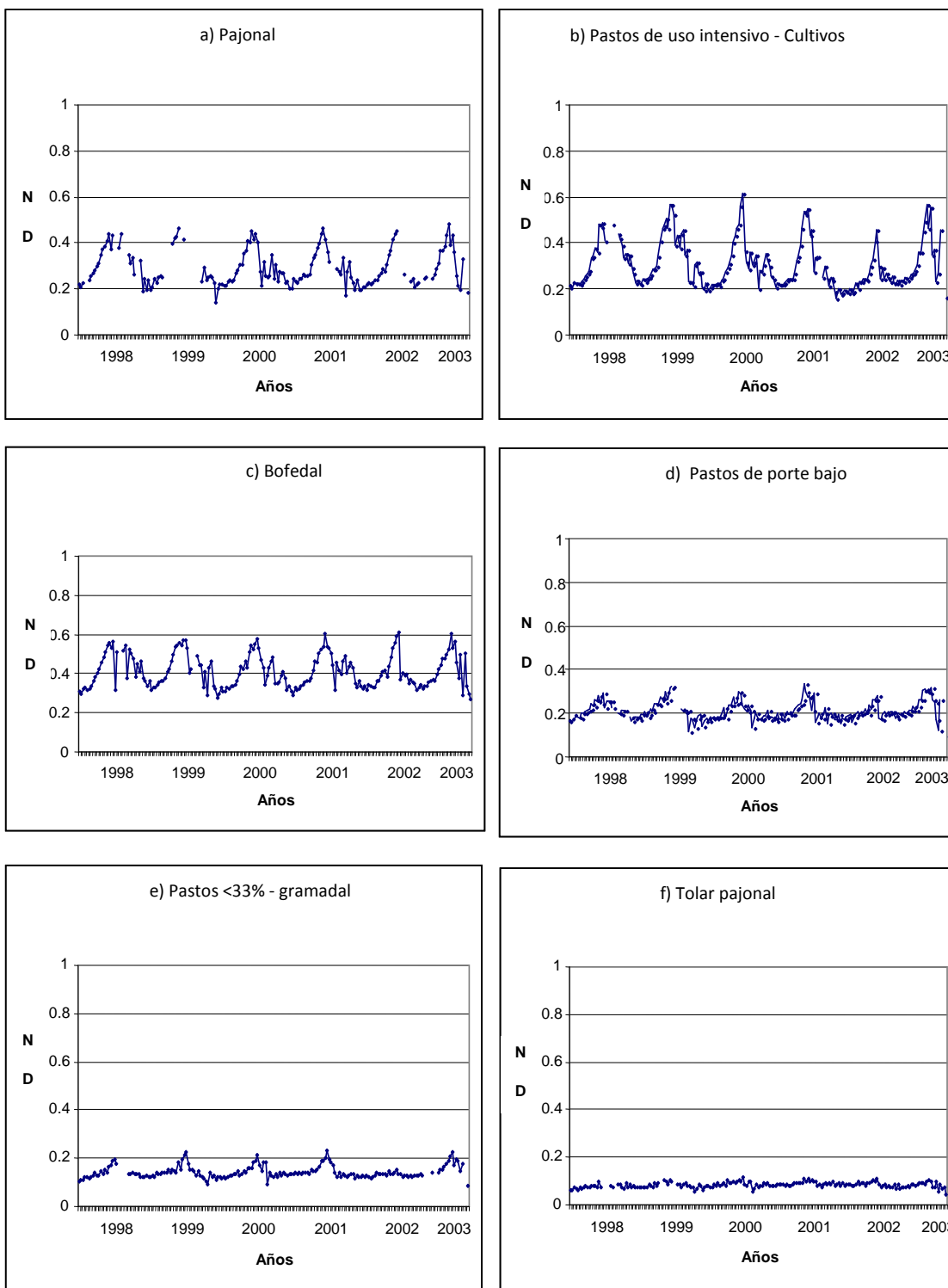


Figura 6. Variación interanual del índice de vegetación en diferentes coberturas vegetales

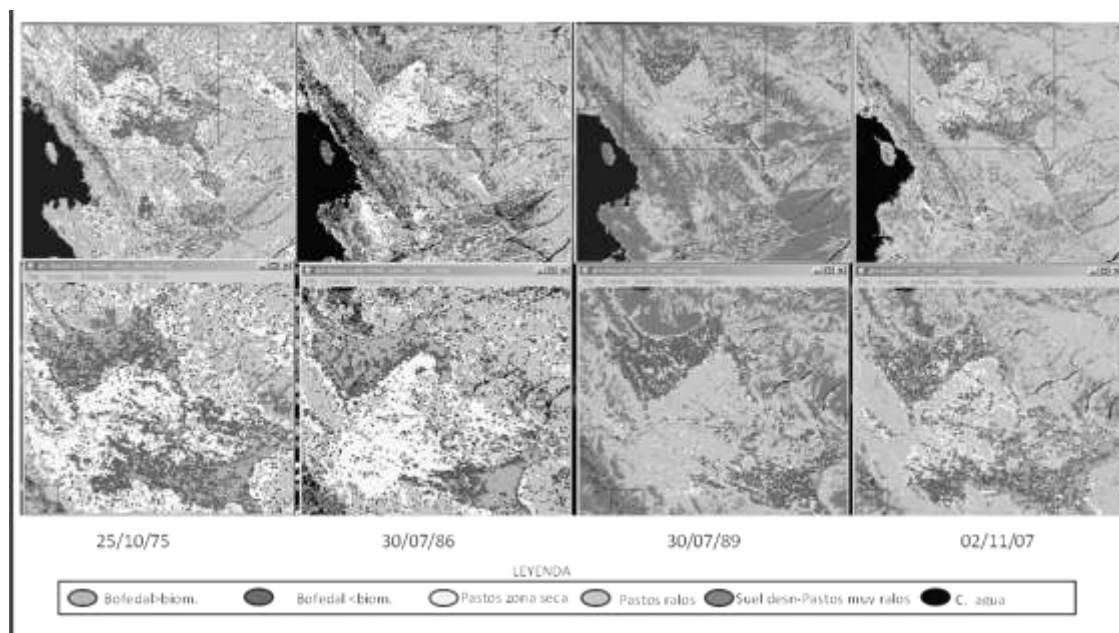


Figura 7. Variación temporal de los bofedales en el área de Huarina Batallas–Bolivia

La superficie de bofedales en el altiplano con pixeles de 30 metros de resolución fue de 127 110 ha. (0.86% del área total).

El área de bofedales está disminuyendo por la presión de uso y probables alteraciones en los regímenes hídricos y térmicos, lo cual afecta la disponibilidad de pastos en la estación seca y de agua en las partes bajas adyacentes a ellos.

Bibliografía

ASTER DEM 2009. ASTER Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM) (<http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/>). (Consultado: julio 09, 2009)

Chávez, P. S. 1996. Image-Based Atmospheric Corrections – Revisited and Improved. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62: 1025-1036.

Cihlar, J. 1996. Identification of contaminated pixels in AVHRR composite images for studies of land biosphere. *Rem. Sens. Environ.* 56: 149-163.

De Cola, L. 1997. Multiresolution covariation among LANDSAT and AVHRR vegetation indices. pp. 73-91. In: D.A. Quattrochi and M.A. Goodchild (eds). *Scale in Remote Sensing and GIS*. Lewis Publishers, Washington D.C.

Defries, R. S. and J. R. G Townshend. 1994. NDVI-derived land cover classification at a global scale. *International Journal of Remote Sensing*, 15: 3567-3586.

Diallo, O. A., A. Diouf, N. P. Hanan, A. Ndiaye and Y. Prevost. 1991. AVHRR monitoring of savanna primary production in

Senegal, West Africa: 1987 – 1988. *International Journal of Remote Sensing* 12: 1259-1279.

Eidenshink, J. C. and J. L. Faundeen. 1994. The 1-km AVHRR global land data set: first stages in implementation. *International Journal of Remote Sensing*, 15: 3443-3462.

Florez M., A. 1993. Producción y utilización de los pastizales Altoandinos del Perú. Red de Pastizales Andinos (REPAAN), CIID Canadá, Lima.

Hobbs, T. J. 1995. The use of NOAA-AVHRR NDVI data to assess herbage production in the arid rangelands of Central Australia. *International Journal of Remote Sensing* 16: 1289-1302.

INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática). 2010. Evolución de la Pobreza al 2009. Informe técnico. INEI, Mayo 2010. Lima.

INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática). 2008. Censos Nacionales 2007: XI de Población y VI de Vivienda, Perú. (<http://proyectos.inei.gob.pe/Censos2007/>). (Consulta: marzo 1, 2010).

INE (Instituto Nacional de Estadística e Informática.). 2009. Estadísticas Departamentales de Bolivia 2008. (<http://www.ine.gov.bo/publicaciones/visorPdf.aspx?codigo=2896>). (Consulta: marzo 10, 2010).

INRENA (Instituto Nacional de Recursos Naturales). 1996. Inventario y evaluación de los recursos altoandinos de la micro región Ilave (Puno). INRENA, Lima.

Justice, C.O., J. R. G. Townshend, B. N. Holben, C. J. Tucker. 1985. Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *International Journal of Remote Sensing* 6: 1271-1318.

Knipling, E. B. 1970. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from

- vegetation. *Remote Sensing of Environment* 1: 155-159.
- Kriegler, F., W. A. Malila, R.F. Nalepka, W. Richardson. 1969. Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition. pp. 97-131. In: *Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Ann Arbor, MI.
- Lobo, A., J. J. Ibáñez and C. Carrera. 1997. Regional scale hierarchical classification of temporal series of AVHRR vegetation index. *International Journal of Remote Sensing* 18: 3167-3193.
- Mandelbrot, B. 1967. How long is the coast of Britain? Statistical self - similarity and fractional dimension. *Science, New Series* 156: 636-638.
- Medina, G., R. Gutiérrez, F. G. Echavarría, M. D. Amador, J. A. Ruiz. 2009. Estimación de la producción de forraje con imágenes de satélite en los pastizales de Zacatecas. *Tec. Pecuaria, México DF* 47:135-144.
- Moreau, S. and T. L. Toan. 2003. Biomass quantification of Andean wetland forages using ERS satellite SAR data for optimizing livestock management. *Remote Sens. Environ.* 84: 477-492.
- NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration). 1998. NOAA KLM User's Guide Sect. 3.1. (<http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/podug/html/c3/sec3-0.htm>). (Consulta: diciembre 4, 2008).
- NASA. 2008. LANDSAT CIRCA 1990-2000. Applied Science & Technology Project Office John C. Stennis Center. Mr. SID. (<https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/>). (Consulta: diciembre 8, 2008).
- ONERN (Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales). 1982. *Clasificación de las Tierras del Perú*. Ed. ONERN, Lima.
- ONERN (Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales). 1965. Programa de Inventario y Evaluación de los Recursos Naturales del Departamento de Puno, sector de prioridad 1. ONERN, Lima.
- Okin, G. S., and D. A. Roberts. 2004. Remote Sensing in Arid Regions: Challenges and Opportunities. In: S. Ustin (ed.). *Remote Sensing for Natural Resource Management and Environmental Monitoring*. Manual of Remote Sensing, 3rd ed. Vol.4. Wiley, New Jersey.
- PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 1996. *Diagnóstico Ambiental del Sistema Titicaca-Desaguadero-Poopo-Salar de Coipasa (Sistema TDPS) Bolivia Perú*. Dpto. Desarrollo Regional y Medio Ambiente, Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos. Washington DC.
- Price J. C. 1992. Estimating vegetation amount from visible and near infrared reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment* 41: 29-34.
- Prince, S. D., and C.J. Tucker. 1986. Satellite Remote sensing of rangeland in Botswana II, NOAA AVHRR and herbaceous vegetation. *International Journal of Remote Sensing* 7: 1555-1570.
- Ruiz Canales, C. y M. Tapia. 1987. Producción y manejo de forrajes en los Andes del Perú. Univ. San Cristóbal de Huamanga Ayacucho y Proyecto de Investigaciones de Sistemas Agropecuarios (PISA), Convenio INIPA-CIID-ACDI, Lima.
- Segnini, A., A. Posadas, R. Quiroz, D. M. B. P. Milori, S. C. Saab, L. Martín Neto, C. M. P. Vaz. 2010. Spectroscopic assessment of soil organic matter in Wetlands from the high Andes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74: 1-9.
- Silvius, M., H. Joosten, and S. Opdam. 2008. Peatlands and people. pp. 20-38. In: Parish, F., A. Sirin, D. Charman, H. Joosten, T. Minaeva and M. Silvius (eds). *Assessment on peatlands, biodiversity and climate change*. Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, Wageningen.
- Swinton, S. M., and R. Quiroz. 2003. Poverty and the deterioration of natural soil capital in the Peruvian Altiplano. *Environment, Development and Sustainability* 5: 477-490.
- Townshend, J. R. G. and C. O. Justice, 1986. Analysis of the dynamics of Africa vegetation using the normalized difference vegetation index. *Int. J. of Rem. Sens.* 7: 1435-45.
- Tucker, C. J. and P.J. Sellers. 1986. Satellite Remote Sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing* 7: 1395-416.
- Tucker, C. J. 1979. Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8: 127-150.
- USGS (United States Geological Survey). *Imágenes AVHRR IKLM*. (<http://edcwww.cr.usgs.gov/landaac/1KM/comp10d.html>) (Consulta: junio 1, 2005).
- VEGETATION. 2009. *Imágenes SPOT VEGETATION*. (<http://free.vgt.vito.be/>) (Consulta: diciembre 4, 2008).
- Walker, P. A. and T. Mallawaarachchi. 1998. Disaggregating agricultural statistics using NOAA-AVHRR NDVI. *Rem. Sens. Environ.* 63: 12-25.