

Evaluación temporal del proceso de desertificación en el enclave seco andino de Villa de Leyva, departamento de Boyacá (Colombia) empleando NDVI de MODIS

Temporal evaluation of desertification process at Villa de Leyva's andean dry location using NDVI of MODIS

José Camilo Fagua¹ y Elena Posada²

Resumen

Esta investigación se centró en determinar la resolución temporal mínima (número mínimo de tomas anuales) que se deben tener para que un sensor remoto óptico pueda evaluar la desertificación en un enclave seco andino en la región de Villa de Leyva (Boyacá). Para esto se analizaron 60 imágenes raster mensuales (de enero del 2006 a diciembre del 2010) correspondientes a los valores de NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) de sensores MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) para la zona de estudio. Con base en los resultados de este análisis, posteriormente se identificaron zonas en proceso de desertificación mediante relaciones lineales y no lineales entre los años 2000 y 2010. Finalmente se estimó el cambio entre los años 2000 y 2010 para tres categorías que son empleadas usualmente para estimar el cambio neto espacial en desertificación: zonas desertificadas, zonas con alto riesgo de desertificación y zonas con bajo riesgo de desertificación.

Palabras clave

NDVI, Villa de Leyva, MODIS, Mann Kendall, análisis de tendencias.

Abstract

Using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) remote sensing, we determine the minimal temporal resolution (the less number of images by year) necessary to evaluate desertification in a dry enclave locates in Villa de Leyva (Boyacá) (Colombia). Specifically, we analyses 60 monthly raster of NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) MODIS (from January 2006 to December 2010) corresponding to this dry enclave. The areas in which desertification increasing, decreasing or not changes significantly were identify using trends analysis (linear and not linear). Additionally, the overall change in the study area from 2000 to 2010 was estimated take into account three categories, lands in desertification, land in high risk of desertification, and lands of low risk of desertification.

Key words

NDVI, Villa de Leyva, MODIS, Mann Kendall, trends analysis.

¹ Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Bogotá (Colombia), camilo.fagua@igac.gov.co
² Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Bogotá (Colombia), eposada@igac.gov.co

Introducción

La Convención de las Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación, la Sequía, y la Degradación de Tierras (CNULD) define desertificación como un proceso en el que tierras fértiles de ecosistemas secos (zonas áridas, semiáridas y/o subhúmedas secas) van perdiendo su fertilidad hasta degradarse a desiertos (CNULD, 2010). Estas zonas son más propensas que otros ecosistemas a la degradación total de sus suelos (desertificación), debido a que la pérdida de coberturas vegetales nativas, causada principalmente por el hombre, hace que sus suelos queden sin protección contra las condiciones climáticas drásticas (que caracterizan estos ecosistemas) y los manejos agrícolas inadecuados, dos fenómenos que en conjunto aceleran dramáticamente la desertificación (Poesen et ál., 1994; Medalus Project, 1999). Por lo tanto, se considera que la principal causa de desertificación es la destrucción total de la vegetación nativa debido a que este tipo de vegetación está adaptada a las condiciones drásticas (climáticas y físicas) que caracterizan a estos ecosistemas, lo cual les permite establecerse y actuar como un agente protector del suelo que lo utiliza sin agotarlo, y que mitiga la degradación que producen las actividades humanas y las variaciones climáticas drásticas (UNU-INWEH, 2007).

Pese a que no existen datos concretos, se plantea que en Colombia debe existir una acelerada tasa de desertificación en zonas secas debido a las condiciones topográficas (cadenas montañosas y valles internos) y climáticas (alta precipitación y vientos fuertes) del país, y a la forma desordenada como se han dado los procesos de ocupación y uso del territorio. Además se asume que otros factores como la erosión, la compactación, la salinización y la contaminación, han dinamizado aun más este proceso (MAVDT 2007). Se estima que el 21,5% (245.342 km²) de Colombia son ecosistemas secos

ubicados principalmente en la región Caribe, los valles interandinos del Magdalena y el Cauca, los altiplanos andinos, y los departamentos del Meta, Arauca y Vichada (IDEAM et ál., 2007). Estimaciones gruesas (escala 1:500.000) basadas en una relación de dos indicadores para identificar zonas propensas a la desertificación (coberturas de ecosistemas secos y suelos salinizados y/o erosionados), han evidenciado que cerca del 78,9% de los ecosistemas secos presentan riesgos de desertificación catalogados entre moderados y muy altos (IDEAM, 2008).

Los sensores remotos son una herramienta esencial para monitorear espacialmente la desertificación; una de las formas para realizar este monitoreo consiste en evaluar la dinámica espaciotemporal de la vegetación, usando índices de vegetación para identificar coberturas vegetales y sus cambios en el tiempo. Se asume que la pérdida de vegetación es un buen indicador de desertificación debido a que cuando está ocurriendo este proceso, el suelo va perdiendo la capacidad para sostener vegetación (bosques, cultivos, plantaciones de árboles, pastos, entre otros en el tiempo), por lo tanto el cambio de coberturas vegetales a suelo desnudo indica un avance espacial de la desertificación.

El NDVI es uno de varios índices (EVI, SAVI, GEMI, entre otros) para identificar vegetación a partir de imágenes de sensores remotos ópticos y se calcula haciendo una relación entre la diferencia de las bandas infrarroja cercana y roja y, su suma; esta relación resalta la vegetación fotosintéticamente activa gracias a la alta reflectividad de la banda infrarroja y a la absorvencia que la banda roja tiene en los vegetales que contienen altas concentraciones de clorofila (hojas verdes), es decir, el NDVI permite identificar vegetación cuando esta tiene altas concentraciones de clorofila. En ecosistemas secos el monitoreo de la desertificación mediante la identificación de coberturas vegetales empleando NDVI no es un ejercicio simple de percepción remota; en estas zonas el NDVI puede mostrar

variaciones anuales estocásticas que en un estudio multitemporal no indicarían disminución o aumento de desertificación, sino variaciones fenológicas de la vegetación. Esto sucede porque en meses secos la vegetación de los ecosistemas secos tiende a perder cobertura y/o a perder sus partes fotosintéticas registrando NDVI. bajos, mientras que en meses lluviosos la vegetación tiende a ganar cobertura y/o a desarrollar hojas con las mayores concentraciones de clorofila, produciendo altos valores de NDVI. Identificar este patrón estocástico anual es primordial para seleccionar los momentos más indicados del año para monitorear anualmente la desertificación, es decir, si en los meses con la mayor cobertura vegetal y con los valores más altos de NDVI se identifican suelos desnudos, necesariamente estos suelos estarían desertificados, puesto que en otras épocas tampoco tendrían cobertura vegetal alguna. Analizar escenas de otros meses (sin tener en cuenta esta variación en el NDVI) llevaría a tener sobrestimaciones o subestimaciones de la desertificación en una región. Una vez identificados los meses indicados para hacer un monitoreo anual de la desertificación es necesario tener un algoritmo que permita identificar zonas en proceso de desertización en un estudio multitemporal anual.

Con base en lo anteriormente expuesto, esta investigación se propuso en primera instancia determinar la resolución temporal anual mínima para que un sensor remoto pueda monitorear desertificación en un enclave seco interandino en Villa de Leyva (departamento de Boyacá, Colombia); para esto se evaluaron 60 raster mensuales de NDVI MODIS desde enero del 2006 a diciembre del 2010. Posteriormente se identificaron zonas en proceso de desertificación mediante relaciones lineales y no lineales de valores mensuales de NDVI de los meses que presentan los máximo de valores dentro de un año. Este análisis se realizó entre el año 2000 y el año 2010. Finalmente se estimó el cambio de zonas desertificadas ocurrido entre el año 2000 y el año 2010.

Materiales y métodos

Área de estudio

El enclave seco andino de Villa de Leyva (departamento de Boyacá, Colombia) es una depresión en el extremo sur del Valle del Río Suárez, bordeada por ejes cordilleranos que sobrepasan los 3 200 m de altitud, los cuales impiden el paso de una gran cantidad de nubes limitando la precipitación (Figura 1). El enclave está bajo la influencia climática de los altiplanos secos de Ubaté y Tundama, los cuales representan superficies de calentamiento que condensan el aire aumentando la temperatura regional (IAVH & Fundación ESC, 2006). La precipitación media anual está entre los 700 y 900 mm (estaciones El Emporio, Pasadena y Villa de Leyva) y es bimodal; épocas de lluvia en abril-mayo y octubre-noviembre (60 % de la precipitación anual) y épocas secas en diciembre-marzo y junio-septiembre (Molano, 1990; municipio de Villa de Leyva, 2004). Dentro del enclave hay un gradiente de precipitación que cambia a medida que se desciende desde las laderas, encontrando las condiciones más secas hacia el centro de la depresión. Allí el calentamiento del aire genera la convección de vientos carentes de humedad que descienden desde las crestas, provocando una fuerte actividad eólica en las vertientes medias y bajas. El gradiente de precipitación se presenta porque los ejes montañosos en los que se enclava este valle, son barreras frente a las masas de vientos húmedos provenientes de los Llanos Orientales y del Magdalena (Molano, 1990). La temperatura media registrada es de 18 °C, con temperaturas máximas absolutas mensuales de 26.8 °C y temperaturas mínimas absolutas mensuales de 7.7 °C (municipio de Villa de Leyva, 2004). Los vientos son fuertes y la alta radiación solar que se da en épocas de sequía, junto con el exceso de evapotranspiración, incrementan el poder erosivo eólico (Hernández-C et ál., 1995).

Métodos

El primer objetivo (determinar el número mínimo de escenas anuales necesarias para que un sensor remoto óptico pueda monitorear desertificación en la zona de estudio) se realizó mediante un estudio multitemporal sobre la variación de los valores NDVI provenientes de 60 capas temáticas de NDVI MODIS para la zona de estudio. Las 60 capas forman una serie de tiempo y corresponden a los valores mensuales NDVI desde enero del 2006 hasta diciembre del 2010. El propósito de este análisis fue determinar si los valores de NDVI varían significativamente dentro y entre los años de estudio y determinar si existe un patrón de comportamiento de los NDVI; para esto se utilizaron tres algoritmos distintos (suavización Weighted Least-Squares, Análisis de Componentes Principales y ANOVA). Weighted Least-Squares es un algoritmo basado en la regresión, una técnica estadística para describir el comportamiento de un grupo de datos; el modelo Weighted Least-Squares aplica una regresión lineal en cada uno de los valores de la curva que se va a suavizar lo cual facilita la identificación de patrones. Cada una de las regresiones se estima en una ventana la cual se define como grupo de datos en el cual el punto evaluado está en la mitad.

Una vez determinados los meses en el año que tienden a tener los máximos valores de NDVI, para el segundo objetivo de esta investigación (elaborar una metodología para identificar zonas en proceso de desertificación) se realizó un análisis de tendencia a largo plazo a una serie de tiempo de 10 años (2000 a 2010) de NDVI MODIS, formada con solo una capa NDVI por año, la cual correspondió a los meses con los valores máximos mensuales de NDVI. Para el análisis de tendencia se utilizó el programa IDRISI SELVA, específicamente se hicieron raster para los siguientes algoritmos de tendencia con módulo Earth Trends Modeler: 1) un raster de coeficientes de determinación (r^2) lo cual permitió verificar los píxeles en los cuales existe una tendencia lineal. 2) Un raster de correlaciones lineales de Pearson (la cual se da en valores entre -1 a 1) lo cual indicó los píxeles que tienden a disminuir

lineal y significativamente los valores de NDVI en el tiempo (si el valor es negativo) y los píxeles que tiende a aumentar lineal y significativamente los valores de NDVI en el tiempo (si el valor es positivo). 3) Un raster de pendientes por píxel de una regresión ordinaria de mínimos cuadrado calculada con valores de NDVI en el tiempo, lo cual indica la tasa de cambio del NDVI en el tiempo, es decir, la tasa de cambio de NDVI por año. 4) Un raster de tendencias monotónicas Mann Kendall, el cual es un indicador de tendencia no lineal que se da en valores entre -1 a 1, donde un valor de 1 indica que la tendencia continuamente creció y nunca decreció, mientras que -1 indica que la tendencia continuamente decreció y nunca creció.

Finalmente, para el tercer objetivo (cambio de zonas desertificadas ocurrido entre el año 2000 y el año 2010) se tuvo en cuenta lo propuesto por Huang & Siegert (2004) quienes plantearon que si el máximo anual de NDVI es inferior a 0.116 entonces se considera como un área desertificada, mientras que si es mayor a 0.26 es vegetación, y si está entre el rango de 0.116 a 0.26 el NDVI no es suficiente para discriminar vegetación, debido a que seguramente corresponde a vegetación esparcida y el NDVI es influenciado por señales del suelo, estas zonas se pueden considerar en riesgo alto de desertificación. Con base con lo anterior se compararon los raster de los meses con máximo valor de NDVI MODIS de los años 2000 y 2010, para así determinar cambios en tres categorías: 1) desierto, 2) áreas con alto riesgo de desertificación (vegetación esparcida), 3) áreas con vegetación con bajo riesgo de desertificación.

también se encontró que los valores mensuales de NDVI varían significativamente entre los meses durante un año ($F_{11, 48} = 2.5121$; $p = 0.013$), siendo diciembre y mayo-junio los meses con el valor de NDVI significativamente más alto ($P = 0.018$ y $P = 0.01$, respectivamente), (Figura 2. (B)). Sin embargo, se encontró que los valores promedio anuales no varían significativamente entre los años evaluados ($F_{4, 55} = 1.1203$, $p = 0.35$), evidenciando que los cambios mensuales dentro de los años se repiten. Asimismo, al analizar los datos mediante un análisis de componentes principales, se encontró que el 70 % de la variación es explicada por dos factores principales ($\lambda = 5.25929$ y $\lambda = 3.01982$); el plot de estos dos factores en 2D (Figura 2. C) muestra que los promedios mensuales de los valores de NDVI forman un grupo con los meses de mayo-junio (máximos valores de NDVI). Los tres análisis que se emplearon (algoritmo Weighted Least-Squares, estadística descriptiva y análisis de componentes principales) llegaron a la misma conclusión, los meses con los valores más altos de NDVI son diciembre y mayo-junio. Estos meses no corresponden a los meses más lluviosos del año, es decir, abril y noviembre, sino a los meses siguientes al mes máximo de precipitación.

El raster de coeficientes de determinación (r^2) mostró que la mayoría de los píxeles no evidencian una tendencia lineal fuerte ($r^2 < 0.7$) indicando que

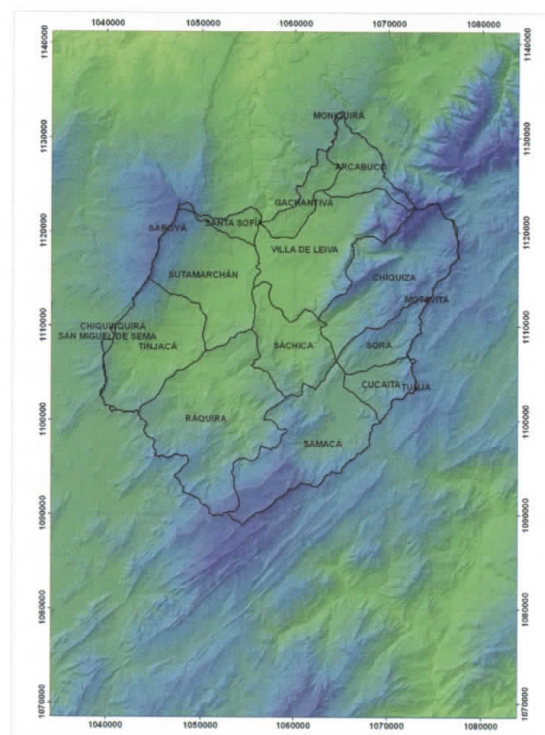
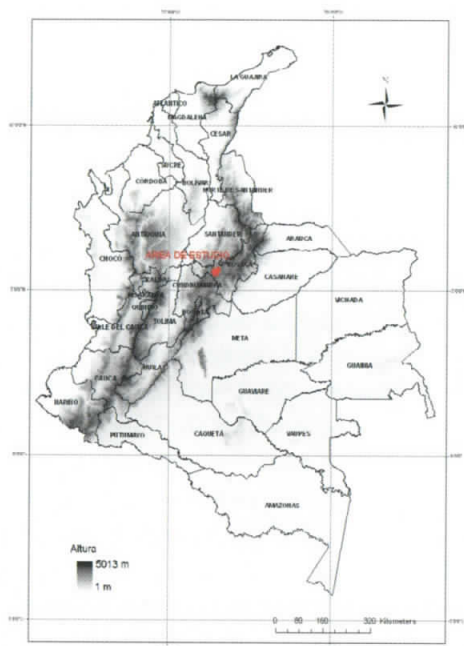


Figura 1. Área de estudio.

Resultados

Después de suavizar la serie de tiempo de 60 NDVI MODIS con el algoritmo Weighted Least-Squares, se identificó una tendencia anual en los valores mensuales de NDVI; dichos valores tienden a ser significativamente más altos en mayo-junio y diciembre (Figura 2. (A)). Por otra parte, empleando una ANOVA paramétrica

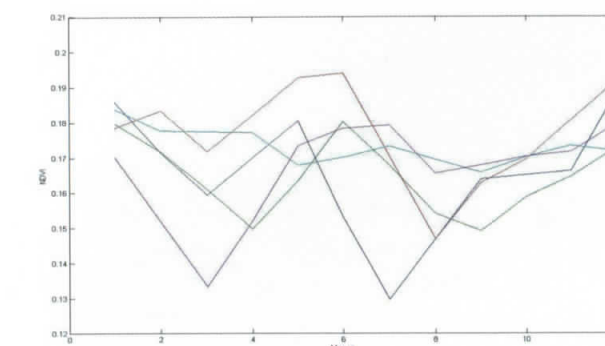


Figura 2. A. Patrón de NDVI por año después de suavización con algoritmo Weighted Least-Squares. Se aprecia que en los meses mayo-junio y diciembre los valores de NDVI son más altos. En azul en 2006; en verde 2007; en rojo 2008; en azul claro 2009; en morado 2010.

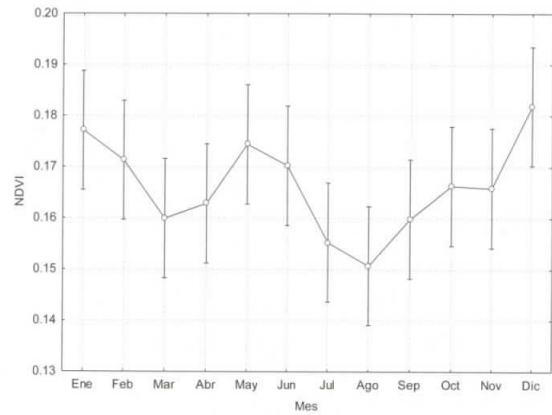


Figura 2. B. Comparación de promedios de NDVI mensuales entre 2006 y 2010.

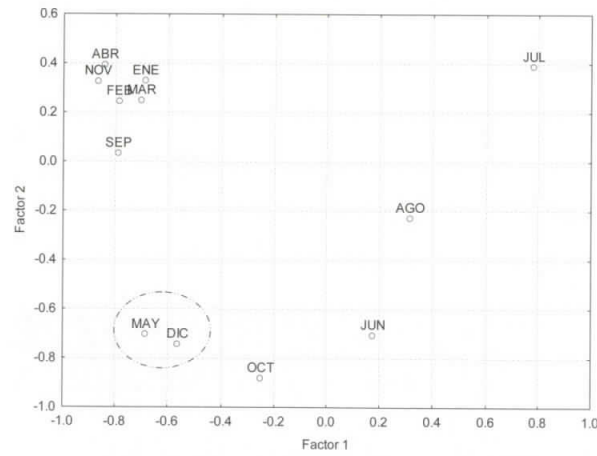


Figura 2. C. Análisis de componentes principales para los valores mensuales promedio de NDVI.

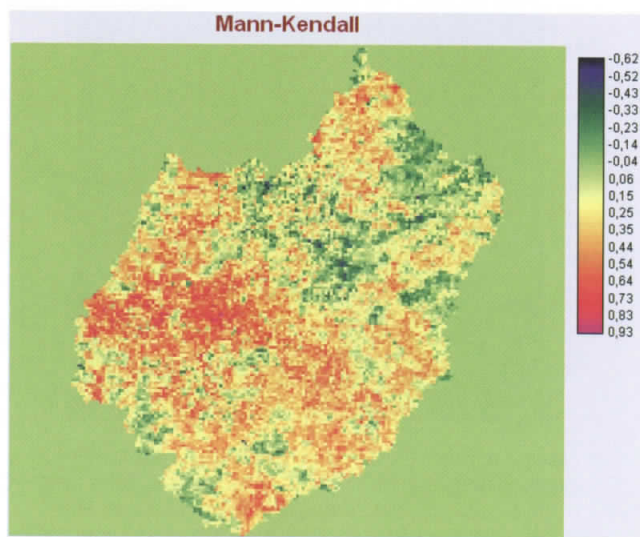


Figura 3. Raster de tendencias monotónicas Mann Kendall.

los análisis de tendencia deberían ser hechos con indicadores no lineales. No obstante al evaluar los dos indicadores lineales, es decir, Raster Pearson y Raster Pendientes se encontró que varios píxeles en el noreste y suroccidente tienen una tendencia negativa indicando disminuciones anuales en los valores de NDVI y por ende desertificación. El indicador no lineal, raster de Mann Kendall (Figura 3), evidencia en las mismas regiones (noreste y sur occidente) áreas más extensas (más píxeles) con tendencia a reducir el NDVI pero con una magnitud menor, es decir, en un proceso de desertificación no tan acelerado como los muestran los indicadores lineales. Finalmente se encontró que en las 40 627.3 hectáreas que conforman el área de estudio, los desiertos de la parte central, principalmente, disminuyeron en un 8 % su cobertura y pasaron a ser áreas en alto riesgo de desertificación (Tabla 1, Figura 4).

Discusión

Los resultados muestran cómo los valores de NDVI cambian significativamente entre los meses de un mismo año, mientras que valores anuales de NDVI no cambian significativamente entre los años; en conjunto estos dos resultados evidencian que las variaciones del NDVI dentro de los años son en gran parte producto de variaciones fenológicas de la vegetación en la región de Villa de Leyva. Dichas variaciones deben ser tenidas en cuenta a la hora de monitorear desertificación, es decir, la comparación ideal para monitorear desertificación en Villa de Leyva debe realizarse con tomas satelitales correspondientes a los meses de diciembre y/o mayo-junio que son los meses con mayores valores de NDVI. Comparar tomas satelitales de sensores remotos en meses distintos llevaría a sobrestimaciones (si se compara un mes con máximos de NDVI vs. un mes con valores mínimos o medios de NDVI) o subestimaciones (si se compara un mes con mínimos de NDVI vs. un mes con valores máximos o medios de NDVI). Este aspecto no había sido tenido en cuenta en ningún análisis espacial previo sobre desertificación o degradación de tierras colombianas empleando sensores remotos, por lo tanto este resultado es un importante aporte metodológico para análisis futuros.

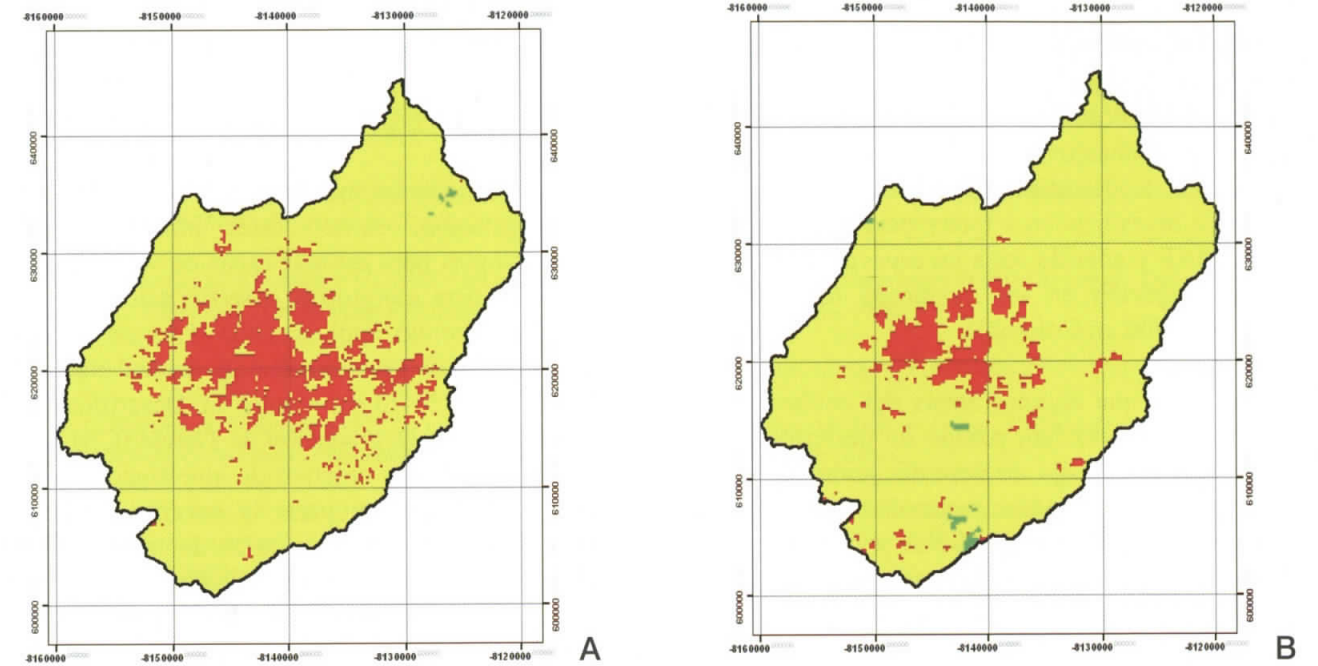


Figura 4. Áreas desertificadas y en alto riesgo para los años 2000 (A) y 2010 (B). En rojo desiertos, en amarillo áreas con alto riesgo de desertificación, en verde áreas con bajo riesgo de desertificación.

Tabla 1. Porcentaje de áreas desertificadas

Estado de desertificación	% de área en 40627.3 ha 2000	% de área en 40627.3 ha 2010
Desierto	14.90	6.87
Alto riesgo de desertificación (vegetación esparcida)	85.01	92.69
Bajo riesgo de desertificación	0.10	0.44

Se esperaba que los valores máximos de NDVI para Villa de Leyva sucedieran en los meses con máxima precipitación, sin embargo los máximos de NDVI sucedieron en los meses subsiguientes al máximo de precipitación (al final de las modas). Investigaciones en otros ecosistemas secos del planeta (ver Huang & Siegert, 2006; Rasmus et al., 2009) han llegado a resultados similares y explican esto porque meses seguidos de precipitación unido a disminuciones no drásticas como las que suceden en el mes siguiente al máximo modal de precipitación, favorece el crecimiento de la vegetación de zonas secas, y además el error atmosférico para los sensores remotos es menor (disminuye humedad, nubes, entre otras).

El enclave seco de Villa de Leyva, ecosistema seco analizado en esta investigación, está localizado en la cordillera Oriental de Colombia, por ser parte de la región Andina, se caracteriza por un régimen bimodal de precipitación. La presencia de dos modas de precipitación produce dos modas (de máximos valores de NDVI) de NDVI subsiguientes a los meses de máxima precipitación. Esto indica que los máximos valores de NDVI en ecosistemas secos dependerían de las modas de precipitación (resultados similares han sido encontrados en otros ecosistemas secos del mundo). En Colombia las modas de precipitación varían en las grandes regiones (Llanos Orientales, Andes, costa Norte, costa Pacífica), lo que indica que para hacer un

monitoreo de desertificación, se debe hacer un estudio similar al que se desarrolló en este proyecto por región geográfica al menos, para garantizar así una identificación adecuada de los meses que deben ser evaluados con sensores remotos en un monitoreo de desertificación. Esto constituye un punto de investigación a futuro para este proyecto en el CIAF y además sería un aspecto obligatorio de investigación en un monitoreo nacional de desertificación en Colombia.

Se encontró que algunas zonas del enclave seco de Villa de Leyva han pasado de desiertos a ser zonas con alto riesgo de desertificación; datos en campo de otros estudios realizados en la misma zona por el Instituto Humboldt, evidencian que esto está ocurriendo por dos razones principales: 1. Algunos de estos terrenos fueron abandonados (debido a su total infertilidad) y la vegetación nativa ha empezado a cubrir algunas de estas zonas, lo que es un primer paso de un largo proceso de recuperación para algunos suelos. 2. Muchos de estos suelos han sido extensamente plantados con pinos (especie foránea), los cuales crecen rápido en estos ambientes, pero lamentablemente deterioran más la fertilidad del suelo, lo que a futuro podría aumentar el problema de desertificación de esta región. No obstante es necesario hacer un estudio con sensores remotos con una mejor resolución espacial para asegurar o negar esta hipótesis. Esto constituye otro punto de investigación a futuro para este proyecto en el CIAF.

Cuando se analizan las tendencias del NDVI en Villa de Leyva en los últimos 10 años, se identifican zonas con alto riesgo de desertificación (que aún no son desiertos) que evidencian disminuciones significativas de NDVI (estimaciones lineales y no lineales). Pese a que se identifican varios sectores con estas características en todo el enclave seco, hay una gran zona con una disminución significativa del NDVI (valores negativos del coeficiente de Mann Kendall) que todavía no es catalogada como desierto. Datos en campo de otros estudios realizados en la misma zona por el Instituto Humboldt, permiten ver que esta es una de las últimas zonas agrícolas de este enclave y

corresponde al valle más fértil de la región. Nuestros resultados evidencian que los suelos de esta zona se están degradando y que podrían convertirse en un desierto en los próximos años.

NDVI es uno de los índices para estimar coberturas de vegetación, existen otros índices y otras metodologías para estimar capas de vegetación, y por ende para monitorear desertificación. En este trabajo se decidió emplear el NDVI por ser la forma que determinó La Convención de las Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación, la Sequía, y la Degradación de Tierras (CNULD). Sin embargo, otro objetivo de investigación en el CIAF puede ser comparar la exactitud temática de las diferentes metodologías de monitoreo de desertificación con sensores remotos.

Conclusiones

En el enclave seco de Villa de Leyva, el NDVI presenta cambios significativos entre los meses de un mismo año, lo que indica cambio de cobertura de la vegetación y/o cambios en los niveles fotosintéticos de la vegetación. Diciembre y mayo-junio, son los meses con mayores valores de NDVI, por tanto se infiere que estos son los meses con mayor cobertura vegetal y/o con mayor actividad fotosintética de la vegetación. Estos meses no corresponden a los meses más lluviosos del año, es decir, abril y noviembre; mayo-junio y diciembre son los meses siguientes a los picos de precipitación. En consecuencia mayo-junio y diciembre son los meses indicados dentro de un año para monitorear desertificación año tras año en el enclave seco de Villa de Leyva; comparar imágenes de otros meses produciría subestimaciones o sobrestimaciones de la desertificación. Se plantea que cada ecosistema seco necesita un análisis como el que se realizó en este trabajo para determinar los meses indicados para mapear y monitorear correctamente con sensores remotos un proceso de desertificación.

Referencias bibliográficas

- Barinas M. y Rojas E. 1993. *Estudio geográfico del municipio de Villa de Leyva. Boyacá. Escuela de Ciencias Sociales y Económicas, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja. Págs. 1 – 72.*
- Becerra R., M. C. & A. V., Méndez G. 1990. *Contribución al estudio de la flora del municipio de Ráquira (Boyacá). Tesis de Pregrado. Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D. C.*
- Cabrales, R., Espitia M. y Velasquez H. 1992. *Uso actual y potencial de los suelos en el municipio de Villa de Leyva. Tesis. Facultad de Ciencias de la Educación, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja. Págs. 8 – 73.*
- Chen, X. Y., Hutley, L. B., & Eamus, D. 2003. *Carbon balance of a tropical savanna of northern Australia. Oecologia, 137, 405–416.*
- Cruz, I., C. Guaque & U. Santos. 1992. *La erosión en la vereda Sopotá. Municipio de Villa de Leyva. Trabajo de grado. Escuela de ciencias sociales y económicas. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja*
- Guerschman J.P, Michael J. H, L. J. Renzullo, Barrett D. J., Marks A. S, Botha E. J. 2009. *Estimating fractional cover of photosynthetic vegetation, non-photosynthetic bare soil in the Australian tropical savanna region upscaling the EO-1 Hyperion and MODIS sensors. Remote Sensing of Environment 113: 928–945.*
- Hernández - C, V. Rueda & H. Sánchez. 1995. *Las Fronteras del Desierto. En: Hernández-C. Desiertos, Zonas Áridas y Semiáridas de Colombia. Banco de Occidente. Bogotá.*
- IAPH (Instituto Humboldt) & Fundación ESC (Ecosistemas Secos de Colombia). 2006. *Evaluación de la biodiversidad asociada, condiciones socioeconómicas y oportunidades de conservación en un enclave seco del altiplano cundiboyacense. Instituto Humboldt . Bogotá D.C. Colombia. P. 130.*
- IAPH. 1997. *Formaciones xerofíticas y subxerofíticas. Págs: 96-105. En: Chávez, M. & N Arango (eds.). Informe Nacional sobre el Estado de la Biodiversidad de Colombia. Tomo I. Ministerio del Medio Ambiente - Naciones Unidas, Bogotá.*
- Huang S & F. Siegert. 2006. *Land cover classification optimized to detect areas at risk of desertification in North China based on Spot Vegetation imagery. Journal of Arid Environments 67:308–327.*
- IAPH. 2001. *Resultados Día de la diversidad Villa de Leyva. Documento publicado en el sitio web <http://araneus.humboldt.org.co/diadeladiversidad/resultados/ambientales.htm>*
- IGAC-ORSTOM. 1984. *Estudio regional integrado del altiplano cundiboyacense: estudio general de suelos. IGAC. Bogotá.*
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. *Suelos de Colombia. Ministerio de Hacienda y Crédito Público. Bogotá. 1995. Págs. 585 – 599.*
- Klaus Schütze Páez. 1999. *Cobertura vegetal del Municipio de Villa de Leyva. Programa de Capacitación, Consejo Ambiental de Villa de Leyva – POT.*
- Leuning, R., Cleugh, H. A., Zegelin, S. J., & Hughes, D. 2005. *Carbon and water fluxes over a temperate Eucalyptus forest and a tropical wet/dry savanna in Australia: measurements and comparison with MODIS remote sensing estimates. Agricultural and Forest Meteorology, 129, 151–173.*
- Liu, X., Jiang, X., 1996. *Extraction of desertification information from the optical and digital processing of multiple-date remotely sensed images. Arid Land Geography 19 (3), 1–6.*
- McTainsh, G. H., Leys, J. F., Carter, D., Butler, H. J., McCord, A., Wain, A., et al. 2006. *Monitoring soil condition across Australia: recommendations from the expert panels. Canberra, Australia: National Committee on Soil and Terrain for the National Land and Water Resources Audit.*
- Medina, E. 1985. *Estudio Ecológico de Zonas Áridas y Semiáridas del Neotrópico. Interciencia 10(5): 223-224.*

Variables obtenidas a partir de sensores remotos para el estudio y monitoreo del cambio climático global

Variables obtained through remote sensing for the study and monitoring of the global climate change

Paola Johanna Isaacs Cubides ¹ y Mauricio Ramírez Daza ²

Molano B., J. 1990. *Villa de Leyva: Ensayo de interpretación social de una catástrofe ecológica*. Fondo FEN. Bogotá. Colombia.

Municipio de Sáchica. 2004. *Esquema de Ordenamiento Territorial*. Administración municipal de Sáchica.

Municipio de Villa de Leyva. 2004. *Plan Básico de Ordenamiento Territorial*. Administración municipal de Villa de Leyva.

Municipio de Villa de Leyva. 2004. *Plan Básico de Ordenamiento Territorial*. Administración municipal de Villa de Leyva.

Nagler, P. L., Inoue, Y., Glenn, E. P., Russ, A. L., & Daughtry, C. S. T. 2003. Cellulose absorption index (CAI) to quantify mixed soil-plant litter scenes. *Remote Sensing of Environment*, 87, 310–325.

Qiu, G.Y., Shimizu, H., Tobe, K., Gao, Y., 2000. Use of vegetation as an indicator of desertification and its applicability in remote sensing. In: *TPN 1 (Asian Reg. Thematic Programme Network Desertification Monit. & Assess.) Workshop, Tokyo 12. 6.*

Rasmus F, Rasmussen K, Theis T & C Mbow. 2009. Evaluation of earth observation based long term vegetation trends — Intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, Terra Modis and Spot VGT data. *Remote Sensing of Environment* 113: 1886–1898.

Rincón, M. 2000. *Fomento del cultivo de frutales andinos con sistemas agroecológicos en Villa de Leyva*. Boyacá. Escuela de Ingeniería Agronómica, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja. Págs. 56–76.

Rodríguez N., Armenteras D., Morales M. & Romero M. 2004. *Ecosistemas de los Andes colombianos*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá D. C., Colombia.

Sarmiento, G. 1975. *Evolution of arid Vegetation in Tropical America*. En: Goodall, D. W. (Ed.). *Evolution of Desert Biota*. Texas University Press. Texas.

Ustin, S. L., Roberts, D. A., Gamon, J. A., Asner, G. P., & Green, R. O. 2004. Using imaging spectroscopy to study ecosystem processes and properties. *Bioscience*, 54, 523–534.

Zha, Y., Gao, J. 1997. Characteristics of desertification and its rehabilitation in China. *Journal of Arid Environments* 37 (3), 419–432.

Zhu, Z., 1985. Status and trend of desertification in northern China. *Journal of Desert Research* 5 (3), 3–11.

Zhu, Z., Wu, H., 1998. *Study on Combating Desertification/Land Degradation in China*. China Environmental Science Press, Beijing, 164 pp.

Resumen

El presente documento corresponde a la revisión de variables que son obtenidas a partir de sensores remotos y que son determinantes en el estudio y monitoreo del cambio climático. Dentro de los grupos líderes de cambio climático, existen unos subgrupos como el Sistema Global de Observación Terrestre (Global Terrestrial Observing System, GTOS), que en su plan de implementación ha identificado trece Variables Climáticas Esenciales (Essential Climate Variables, ECV) para ser abordadas a través de los grupos de observación de la Tierra existentes en el mundo. En el presente documento se muestra la revisión de las variables obtenidas a partir de sensores remotos como parte de la estrategia de implementación de datos para el estudio y monitoreo del cambio climático global.

Palabras clave

Sensores remotos, cambio climático, variables climáticas esenciales.

Abstract

This document corresponds to the review of the variables that are obtained from remote sensing sensors that are important in the study and monitoring of climate change. Among the leading groups of climate change, there are some groups such as the Global Terrestrial Observing System (GTOS) which in its implementation plan has identified thirteen Essential Climate Variables (ECV) to be addressed through the groups of earth observation in the world. This paper presents a review of these variables obtained from remote sensing as part of the implementation strategy of remote sensing data for studying and monitoring global climate change.

Key words

Remote sensing, climate changing, essential climate variables.

¹ Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Bogotá (Colombia), paola.isaacs@igac.gov.co

² Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Bogotá (Colombia), hmramirez@igac.gov.co