

## ANÁLISIS DE LA DINÁMICA ESPACIO-TEMPORAL DE LA VEGETACIÓN EN LA ISLA DE LA ESPAÑOLA USANDO DATOS DEL SENSOR NOAA-AVHRR

P. A. Hernández-Leal, M. Arbelo, L. Arvelo-Valencia

pedro.hernandez@ull.es

*Departamento de Física F. E. E. S. Universidad de La Laguna. 38200 La Laguna. Tenerife. Canarias. España.*

### ABSTRACT

La desertificación y en particular la deforestación que afecta a los bosques tropicales, representa un importante problema medioambiental. En el presente trabajo, se realiza un estudio mediante datos del Global Land 1-km AVHRR Project, de la evolución de la dinámica de la vegetación en una zona especialmente dañada por la actividad humana, esto es la isla de la Española. El estudio se centra fundamentalmente en la zona de transición entre Haití y la República Dominicana, utilizando como parámetros claves del análisis el índice de vegetación conocido como NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) y la temperatura del terreno (LST). El análisis combinado de estas variables confirma las enormes diferencias en cobertura vegetal entre ambos países, indicando la enorme sobreexplotación a la que se han visto sometidos los recursos forestales de Haití.

Desertification and particularly the study of tropical forest deforestation represent an important environmental problem. Using data from the Global Land 1km-AVHRR Project data set, a study about land cover dynamics in a specially damage area by human activity has been made, this is the case of the Hispaniola Island. We have focused on the border region between Haiti and Dominican Republic, using the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and Land Surface Temperature (LST) as key parameters. The combined analysis of these two variables, clearly confirm much higher mean monthly NDVI trends in the Dominican side and remark the more extreme biomass changes and over pressure against Haiti natural forests.

**Palabras clave:** AVHRR, desertificación, temperatura de la superficie terrestre, NDVI

### INTRODUCCIÓN

Los sensores a bordo de satélites han demostrado ser especialmente útiles para monitorizar la dinámica espacio-temporal de la vegetación. Entre ellos, los diferentes canales del sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), a bordo de los satélites NOAA han sido profusamente utilizados en estudios de desertificación. En particular, los canales 1 (0,58 – 0,68  $\mu\text{m}$ ) y 2 (0,72 – 1,10  $\mu\text{m}$ ) se han usado para la definición de diferentes índices de vegetación de los que el más conocido es el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). También se han utilizado los canales 3 y 4, ambos sensibles a la radiación emitida y reflejada por la superficie terrestre, para por ejemplo, determinar la frontera entre un bosque y terreno no vegetado. Otra alternativa en este tipo de análisis, es la propuesta por Lamblin y Erlich (1995) quienes han mostrado la ventaja de usar los canales térmicos, esto es, canal 4 (10,3 – 11,3  $\mu\text{m}$ ) y canal 5 (11,5 – 12,5  $\mu\text{m}$ ) para determinar la temperatura de la superficie terrestre (LST) y realizar un análisis combinado con el NDVI de la evolución de la vegetación.

Las fronteras políticas entre países con un marcado contraste en aspectos culturales, de desarrollo económico y de protección medioambiental, son zonas especialmente interesantes para estudiar como el impacto de las actividades humanas puede afectar a la vegetación, que de otra manera debería seguir evoluciones similares a ambos lados de la frontera. La isla caribeña de La Española, compartida por la República Dominicana y Haití, representa un ejemplo extremo de degradación, donde las causas antropogénicas de la deforestación, fundamentalmente en Haití, son notorias a lo largo de toda la zona fronteriza.

Los problemas de desertificación en esta isla han sido objeto de estudio, si bien habitualmente, se han centrado en uno u otro país por separado, siendo escasos los trabajos en la zona de transición próxima a la frontera. Con el objeto de remarcar estas diferencias, hemos realizado el análisis de los patrones de NDVI y LST en una

serie de regiones test, situadas en lados opuestos de la zona fronteriza.

## DATOS Y METODOLOGÍA

Haciendo uso de la información incluida en la base de datos Global Land 1-km AVHRR Project (Eindenshink and Faudeen, 1994), hemos realizado un análisis de la dinámica de la cobertura vegetal en la zona bajo análisis. Es ésta, una base de datos de composiciones multitemporales de NDVI, realizadas sobre periodos de 10 días, basadas en el método de máximo NDVI (Holben, 1986). La cobertura de estos datos es global, con una resolución espacial de 1 km, comprendiendo el periodo 1992-1996. Nuestro estudio se ha centrado en la evolución temporal de la vegetación y la temperatura a lo largo de la zona de transición entre la República Dominicana y Haití, usando los canales 4 y 5 (bandas 4 y 5 de los datos del proyecto) para la estimación de la temperatura (LST) y la banda 6 que se corresponde con los datos de NDVI.

Asimismo, con el objeto de realizar una correcta estimación de la LST, como se verá más abajo, hemos utilizado como datos auxiliares la información de la base de datos Pathfinder Matchups Database (PFMDB), la más amplia en la actualidad, y resultado de la compilación de información plurianual y para varios satélites, de la SST tomada "in situ" por boyas fijas y/o a la deriva, y medidas AVHRR coincidentes en el tiempo dentro de  $\pm 30$  minutos y en el espacio en  $\pm 0,1^\circ$  ( $\sim 10$  km) de latitud y longitud. El estudio con estos datos ha sido restringido al periodo que va de Enero de 1995 a Diciembre de 1999. La región oceánica elegida comprende el mar Caribe y la porción del océano Atlántico que baña la costa norte de las Antillas mayores y menores, con características tanto atmosféricas como oceánicas similares al entorno próximo de la isla de La Española. De un total de datos de 13.533 "matchups", sólo se seleccionaron finalmente 4.145, tras la eliminación de los datos diurnos (para evitar las diferencias entre las medidas de la capa superficial y la medida efectuada por las boyas) y la aplicación de test umbrales de calidad de los mismos (Kilpatrick et al., 2001).

La estimación de la LST usando las temperaturas de brillo de los canales 4 y 5 del sensor AVHRR, puede llevarse a cabo mediante la aplicación de la técnica conocida como Split-Window (SW). Con el objeto de tener en cuenta las condiciones atmosféricas singulares de la zona tropical objeto de nuestro estudio (altos contenidos de vapor de agua en la atmósfera), se ha

desarrollado un algoritmo regional SW. Hemos separado el efecto de la emisividad y el atmosférico (Coll et al., 1994), de manera que la ecuación SW quedaría como sigue:

$$T = T_4 + A(T_4 - T_5) + \Delta + B(\epsilon) \quad (1)$$

En esta expresión,  $A$  y  $\Delta$  son términos que incluyen la dependencia atmosférica en función de las transmisividades en los canales 4 y 5, esto es,  $\tau_4(\theta)$  y  $\tau_5(\theta)$ , mientras que la corrección por emisividad queda concentrada en el término  $B(\epsilon)$ .

Así, separando ambas contribuciones, será posible usar un algoritmo desarrollado para la estimación de la temperatura superficial del mar (SST), para calcular la contribución de la atmósfera y posteriormente, añadir el término de emisividad para obtener finalmente la LST. Por tanto, los coeficientes  $A$  y  $\Delta$  han sido obtenidos mediante regresión lineal con datos de la base PFMDB, y el factor  $B(\epsilon)$  ha sido calculado utilizando valores simulados con el código de transferencia radiativa MODTRAN-2 (Berk et al., 1989) y radiosondeos coincidentes de la estación meteorológica de Santo Domingo en la República Dominicana.

## RESULTADOS

Para garantizar una correcta estimación y validación de  $A$  y  $\Delta$ , hemos dividido, de forma aleatoria el conjunto de 4.145 matchups de la base PFMDB en dos subconjuntos independientes: el conjunto de entrenamiento, del que hemos obtenido los coeficientes de la regresión y el conjunto de validación que ha sido utilizado para chequear la respuesta del algoritmo para la SST, y consecuentemente para la parte atmosférica del algoritmo que define la LST. Ambos conjuntos tienen una distribución geográfica similar y constan de un número casi idéntico de datos. Una regresión lineal simple para los datos de entrenamiento nos permite obtener la ecuación (2) para la estimación de la SST:

$$SST = T_4 + 2,5429(T_4 - T_5) - 0,8864 \quad (2)$$

La aplicación de este algoritmo al conjunto de validación, produce una desviación estándar de  $0,64^\circ\text{C}$ , que mejora ligeramente los valores típicos obtenidos mediante algoritmos globales para regiones tropicales.

El siguiente paso en nuestro desarrollo sería la determinación del término corrector de emisividad. Si re-escribimos el coeficiente  $B(\epsilon)$  en

términos de la emisividad media para los canales 4 y 5, esto es,  $\varepsilon = (\varepsilon_4 + \varepsilon_5)/2$ , y la diferencia espectral de emisividades,  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_4 - \varepsilon_5$ , quedaría de la siguiente manera (Coll et al, 1994):

$$B(\varepsilon) = \alpha(1-\varepsilon) - \beta\Delta\varepsilon \quad (3)$$

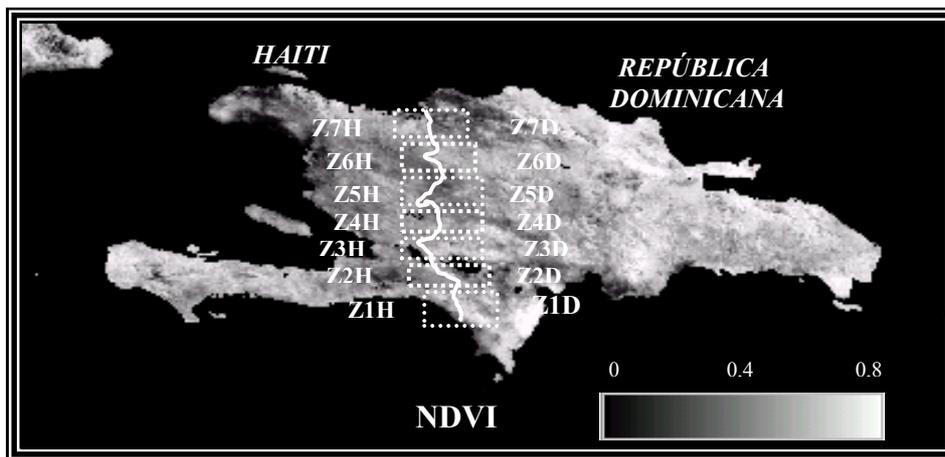
La obtención de un algoritmo LST operacional requiere por tanto de la estimación de los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$ . Con este objetivo, hemos utilizado datos simulados de medidas de satélite para las condiciones atmosféricas típicas de esta región, definidas a través de un conjunto de 50 radiosondeos de la estación situada en Santo Domingo, con un contenido total de vapor de agua en el intervalo 1,51 y 5,48 g/cm<sup>2</sup>. Hemos considerado asimismo, dos tipos de superficies (vegetación densa:  $\varepsilon_4 = 0,985$ ,  $\varepsilon_5 = 0,985$ ; y suelo desnudo:  $\varepsilon_4 = 0,95$ ,  $\varepsilon_5 = 0,97$ ); cuatro temperaturas ( $T$ ,  $T-5$ ,  $T+5$ ,  $T+10$  K) y tres ángulos diferentes de observación (0, 30, 50°). El efecto de los gases fijos atmosféricos se ha extraído del perfil atmosférico Tropical Standard, incluido en el código MODTRAN 2.

Considerando que para las superficies naturales bajo estudio siempre hemos encontrado

valores nulos o negativos para  $\Delta\varepsilon$ , el efecto del segundo término en  $B(\varepsilon)$  tiende a ser despreciable, y como consecuencia, como sugieren algunos autores (Ulivieri et al., 1992), podremos elegir valores constantes para  $\alpha$  y  $\beta$ , como los obtenidos mediante simulación. Con esto, el algoritmo regional para la estimación de la LST vendría expresado como sigue:

$$LST = T_4 + 2,5429(T_4 - T_5) - 0,8864 + 35(1 - \varepsilon) - 57\Delta\varepsilon \quad (4)$$

Finalmente, la estimación de los términos  $\Delta\varepsilon$  y  $\varepsilon$  se ha realizado siguiendo el método desarrollado por Sobrino et al.(2000) dada su aplicabilidad simple a los datos del Global Land 1-km Project. Este consiste básicamente en dividir el conjunto de superficies naturales en tres grupos, dependiendo de los valores de NDVI asociados a las mismas. Para cada intervalo de NDVI se aplican diferentes expresiones para determinar  $\Delta\varepsilon$  y  $\varepsilon$ , en función de medidas obtenidas por satélites (NDVI, o directamente los datos de canal 1 y 2), y algunas medidas de campo sobre muestras de vegetación características de la isla de la Española.



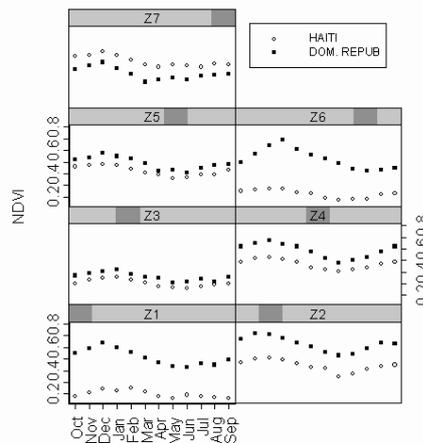
**Figura 1.** Composición mensual de NDVI de la isla de la Española (Diciembre de 1992). Se muestra la división en las 14 zonas objeto de nuestro análisis

### Análisis LST-NDVI.

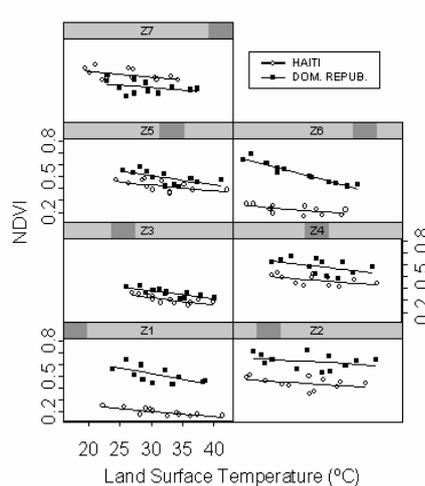
Para estudiar la dinámica de la vegetación a lo largo de la zona fronteriza, hemos seleccionado finalmente el periodo que comprende desde Octubre de 1992 a Septiembre de 1993, dado que es éste el único periodo dentro del conjunto de datos del Global Land-1km Project, con continuidad temporal en los datos. En una región tropical como ésta, en ocasiones la contaminación por nubes representa un serio problema en este tipo de estudios, de forma que hemos decidido realizar composiciones mensuales de NDVI a partir de los datos de décadas, para obtener una mejora en la limpieza de nubes de la imagen. Además se han efectuado composiciones mensuales de  $T_4$  y  $T_5$ , para ser usadas en el algoritmo regional SW, previamente desarrollado para la obtención de la LST. Nuestro estudio ha sido dividido en 7 zonas (Figura 1) a lo largo de la región de transición, considerando los valores medios de NDVI y LST en las sub-zonas haitianas y dominicanas. Estas zonas se han hecho coincidir aproximadamente con las previamente definidas en un estudio de campo y con imágenes Landsat-TM, realizado en colaboración con el Center for Earth and Environmental Science de la Universidad de Purdue en Indianápolis (EEUU), con el objeto de facilitar el análisis de los resultados.

En la figura 2 se puede observar la evolución de los valores promedio de NDVI para el periodo seleccionado y las zonas test bajo análisis. Se han obtenido valores persistentemente más altos para casi todas las zonas, excepto para la región más al norte de la frontera (zona 7). Las diferencias más importantes se encuentran en la zona 1, que geográficamente se corresponde con el Massif du Selle (Haiti)/Valle del Río Pedernales (República Dominicana) y la zona 6, esto es Montagnes du Nord (Haiti)/Cordillera Central (República Dominicana). Los valores de NDVI diferenciales en estas regiones varían en el intervalo de 0,2 - 0,4, y la práctica ausencia de vegetación en el lado haitiano (suelos desnudos o escasamente vegetados), se traduce en una curva prácticamente plana para la evolución anual del NDVI, con pequeñas diferencias en su valor. Por su parte en las restantes regiones las diferencias oscilan entre 0,1 -0,2. Por otro lado, se observa como los valores mínimos están centrados en todos los casos en los meses de Abril-Mayo y los máximos se obtienen para Noviembre-Diciembre, correspondiendo respectivamente, con el principio y final de la época de lluvias en esta zona del Caribe, como era previsible. La evolución observada en las diferentes zonas, encaja a la perfección con nuestro análisis previo realizado con imágenes de NDVI y

composiciones en falso color de escenas Landsat-TM de la zona de transición.



**Figura 2.** Gráficos de evolución temporal (Octubre 1992-Septiembre 1993) de los promedios mensuales de NDVI en las 14 zonas test definidas.



**Figura 3.** Representación de los valores promedio mensuales (Octubre 1992-Septiembre 1993) de NDVI frente a los promedios de LST en cada una de las zonas definidas sobre la región de transición.

Si representamos los promedios mensuales de NDVI y LST (esta última obtenida a través de nuestro algoritmo SW), obtendríamos el gráfico de la figura 3. Las curvas de ajuste mostradas en los mismos, denotan una correlación obvia entre la LST y el NDVI. Es evidente el claro contraste a ambos lados de la frontera, en término de patrones de NDVI y tendencias en la LST a lo largo de todo el año, con valores ligeramente más elevados para la temperatura de las zonas test del lado haitiano.

En lo que se refiere a la evolución de los patrones de temperatura, podemos observar comportamientos similares a ambos lados de la frontera. Los valores más altos de NDVI en el lado dominicano, provocan un desplazamiento apreciable en temperaturas, con valores más altos en el lado de Haití para la LST, mostrando así la importancia de un análisis combinado de ambos parámetros, no sólo para la evolución de la cobertura vegetal en la zona de transición sino para su análisis para la Isla al completo. Una vez más, las zonas 1 y 6 representan en estos gráficos los casos más importantes de degradación a lo largo de la frontera, con considerables diferencias entre las rectas de ajuste e importantes cambios en la pendiente de las mismas.

#### DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

En nuestro análisis de los datos AVHRR, para la zona fronteriza de Haití y República Dominicana, hemos encontrado valores persistentemente más altos para el NDVI en el lado dominicano. Para el cálculo de la temperatura de la superficie terrestre, analizada aquí como parámetro modulador de la desertificación, hemos particularizado el algoritmo desarrollado para el mar con datos PFMDB, al caso terrestre. Si bien, se ha encontrado una correlación negativa entre NDVI y LST, esta dependencia puede variar apreciablemente en función de factores como la altitud (como moderador de la temperatura), el contenido en humedad, elevado en ciertas cordilleras por el efecto de los Alisios, la orografía del terreno, etc., de manera que esta relación debería ser analizada con más detenimiento. Los datos generados en este estudio nos han ayudado a obtener una mejor comprensión de los contrastes vegetativos en la zona fronteriza entre la República Dominicana y Haití, si bien conclusiones categóricas acerca de la dinámica temporal, requerirán de la ampliación del presente estudio a una serie más larga. En este sentido planeamos extender el análisis al periodo completo abarcado en el Global Land 1-km AVHRR Project Data set, la recolección de más medidas de campo, así como la utilización de otros sensores con distinta

resolución espacial. La relación existente entre la dinámica espacio-temporal de la vegetación y factores potencialmente determinantes en su evolución, como pueden ser el contraste socioeconómico, las diferencias culturales en la política de uso del suelo, etc., queda constatada con este análisis de zonas muy próximas, en las que la causa de la aceleración de los procesos de desertificación es a todas luces de origen antropogénico.

#### BIBLIOGRAFIA

Berk, A. et al., 1989, MODTRAN: A moderate Resolution model for LOWTRAN 7, GL-TR-89-0122.

Coll, C., Caselles, V., Sobrino, J. A. y Valor, E., On the atmospheric dependence of the split-window equation for land surface temperature, *International Journal of Remote Sensing*, **15**: 105-122, 1994.

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

Holben, B.N., Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, **7**:1417-1434, 1986.

Kilpatrick, K., G. Podestá y R. Evans, Overview of the NOAA/NASA advanced very high resolution radiometer Pathfinder algorithm for sea surface temperature and associated matchup database, *J. Geophys. Res.*, **106 (C5)**, 9,179-9,197, 2001.

Lamblin, E. F. y Erlich, D., Combining vegetation indices and surface temperature for land cover mapping at broad scales. *International Journal of Remote Sensing*, **16**: 573-579, 1995.

Sobrino, J.A. y Raissouni, N., Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: application to Morocco. *International Journal of Remote Sensing*, **21**: 353-366, 2000.

Uliveiri, C., Castronuovo, M. M., Francioni, R., y Cardillo, A., A split window algorithm for estimating land surface temperatures from satellites. *Advances in Space Research*, **14**, 3: 59-65, 1992.