

VARIABILIDAD ANUAL E INTERANUAL EN EL ESCALAMIENTO ESPACIAL DEL ÍNDICE DIFERENCIAL NORMALIZADO DE VEGETACIÓN (NDVI) EN LA AMAZONÍA

Luis F. Salazar y Germán Poveda

Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas

Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

gpoveda@unalmed.edu.co

Recibido para evaluación: 17 de Julio de 2003 / Aceptación: 25 de Septiembre de 2003 / Recibida versión final: 26 de Septiembre de 2003

RESUMEN

El Índice Diferencial Normalizado de Vegetación (NDVI) ha sido utilizado ampliamente como una medida de la actividad vegetal y para la estimación de variables hidrológicas, como la evapotranspiración. Para caracterizar y cuantificar la dependencia de la variabilidad espacial del campo de NDVI con respecto a la escala, sobre la cuenca Amazónica, se utilizan herramientas de cuantificación de las propiedades estadísticas de escalamiento simple y múltiple de campos aleatorios, como el espectro de potencias de Fourier en dos dimensiones y el análisis del escalamiento de los momentos. La cuantificación se efectúa para los campos mensuales del periodo 1982 a 1993 a una resolución espacial de 8 km. Los resultados permiten identificar que el espectro de Fourier se comporta como $E(k) = c(t)k^{-\beta(t)}$, con dos regiones en el espectro de potencias, separadas en la escala de 24 km, por encima del cual el exponente de escalamiento se comporta como $2 < \beta < 0$, y por debajo del cual $\beta \approx 0$ (nivel de ruido). La evolución mensual del exponente de escalamiento, $\beta(t)$, tiene una relación inversa con la valor medio de NDVI, y una relación directa con la desviación estándar, con valores de correlación estadísticamente significativos. También se encontró una alta correlación negativa (-0.8, $P > 0.95$) entre las series de tiempo del exponente de escalamiento, $\beta(t)$, y del prefactor, $c(t)$, así como entre la serie de tiempo del exponente, $\beta(t)$, y los valores medios mensuales de precipitación sobre la Amazonia (-0.77, $P > 0.95$). Estos resultados ponen de manifiesto el gran poder de síntesis de las ideas de escalamiento con respecto a fenómenos físicos que gobiernan la dinámica hidro-ecológica de la cuenca Amazónica. El análisis de la variabilidad interanual asociada a la ocurrencia de las dos fases del fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) demuestra que el exponente, $\beta(t)$, presenta una disminución durante el evento de La Niña y un aumento durante la ocurrencia de El Niño. El análisis del comportamiento del escalamiento de los momentos permite identificar la presencia de escalamiento múltiple en el campo de NDVI. El conocimiento de las características de escalamiento de los campos de NDVI tiene importantes implicaciones en la dinámica hidrológica, ecológica y en los balances de agua, energía y Carbono sobre un rango muy amplio de escalas espaciales en la Amazonia.

PALABRAS CLAVES:

Escalamiento, NDVI, Actividad Vegetal, Flujos Hidro-ecológicos, Amazonas, Análisis de Fourier, ENSO.

ABSTRACT

The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) has been widely used as a measure of vegetation activity and health, but also to estimate hydrological variables such as evapotranspiration. We characterize and quantify the spatial variability of NDVI and its dependence with scale over the Amazon River basin, using simple and multi-scaling properties of random fields, such as the bi-dimensional Fourier spectrum, and the moment-scaling analysis. Quantification is performed for the NDVI monthly fields for the period 1982 through 1993, at 8-km spatial resolution. Our results identified that the Fourier spectra behave as $E(k, t) = c(t)k^{-\beta(t)}$, with two different regions separated at the scale of 24 km, above which the scaling exponent $2 < \beta < 0$, and below which $\beta \approx 0$ (noise level). The monthly evolution of scaling exponents, $\beta(t)$, is highly (negatively) correlated with the mean value of NDVI field, and positively correlated with the standard deviation. A strong negative correlation (-0.8, $P > 0.95$) was found between the monthly values of the scaling exponent, $\beta(t)$, and the prefactor, $c(t)$. Another remarkable finding is the high correlation between the exponent, $\beta(t)$, and the monthly average precipitation over the entire Amazon basin (-0.77, $P > 0.95$). These findings point out the power of the scaling framework to synthesize the physical mechanisms underlying the hydro-ecological dynamics of the Amazon River basin. Results of interannual variability associated with the two phases of El Niño/Southern Oscillation (ENSO) show that the scaling exponent diminishes during La Niña, whereas it increases during El Niño. Results from the moment-scale analysis indicate the existence of multi-scaling associated with the spatial variability of NDVI fields. These scaling properties of NDVI have important implications on the hydro-ecological dynamics of Amazonia, involving water, energy and Carbon balances in a wide range of spatial scales.

KEY WORDS:

Scaling, NDVI, Vegetation Activity, Hydro-ecological fluxes, Amazon, Fourier, ENSO.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de la tecnología satelital ha contribuido a mejorar significativamente el estudio de la distribución espacial de campos hidrológicos, ecológicos y climáticos. La actividad vegetal está completamente vinculada con la dinámica del terreno, el clima, los flujos hidro-ecológicos, así como con los balances de agua, energía y Carbono, en un rango muy amplio de escalas espaciales y temporales. Algunos índices de la actividad vegetal se construyen con información satelital mediante el uso de datos de reflectancia de distintas combinaciones de bandas espectrales, los cuales realzan la contribución de la vegetación en función de la respuesta espectral de una superficie y la de atenuar otros factores diferentes a la vegetación. Uno de tales índices es el llamado Índice Diferencial Normalizado de Vegetación (*NDVI*), el cual ha sido identificado como una medida de la actividad fotosintética de las plantas, ya que se define en términos de la interacción de la radiación solar y la presencia de la clorofila en las hojas de las plantas. El *NDVI* es definido como [Tarpley et al. (1984)],

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (1)$$

donde *NIR* es la respuesta espectral de la banda del infrarrojo cercano (0.73 – 1.1 μm) y *Red* representa la respuesta espectral en la banda del rojo (0.55-0.68 μm). Todos los organismos fotosintéticos contienen uno o más pigmentos capaces de absorber la radiación visible que inicia las reacciones fotoquímicas y fotosintéticas. El valor del *NDVI* es bastante sensible a cambios que pueda tener la vegetación en diferentes condiciones de radiación solar. Numerosos estudios han mostrado la relación que tiene este índice de vegetación con diferentes variables presentes en el balance de agua, tales como la humedad del suelo, la precipitación [Hess et al. (1996)] y la evaporación [Szilagyi (1998)]. Por tanto el conocimiento de las propiedades espaciales de esta variable puede servir de apoyo para el cálculo e implementación de nuevas metodologías en la estimación de algunas variables importantes, cuando no se tienen registros continuos, ni de buena resolución espacial. Diferentes autores han estudiado la aplicabilidad del *NDVI* para estimar la evapotranspiración. Seevers et al. (1994) y Nicholson et al. (1996) muestran la fuerte relación existente entre estas dos variables en ambientes húmedos. Szilagyi et al. (1998) encuentra una correlación significativa con un

cierto tiempo de rezago entre las dos variables, cuando el *NDVI* antecede a la evapotranspiración. Cambios interanuales en la vegetación han sido estudiados a escala global a través de estimaciones del *NDVI* [Tucker and Choudhury (1987), Gutman (1991), Kogan and Sullivan (1992)]. Poveda et al. (2001) han demostrado la incidencia del fenómeno El Niño sobre la disminución de la actividad vegetal representado por el *NDVI* en Colombia y en Sur América tropical. El *NDVI* es uno de los índices de vegetación más utilizados, ya que presenta ventajas como: (i) simplicidad de cálculo, (ii) alto grado de correlación con otros parámetros de la vegetación, y (iii) disponibilidad de información con buena resolución temporal y espacial.

En este trabajo se analizarán propiedades relevantes del escalamiento espacial del *NDVI* para una región de la cuenca amazónica y se estudia su relación con procesos hidrológicos fundamentales, como la precipitación sobre la cuenca. En el numeral 2 se da la descripción de los datos y las metodologías utilizadas, en el numeral 3 se muestran los resultados encontrados y finalmente en el capítulo 4 se presentan las conclusiones.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

Para el desarrollo de los análisis se utilizó información mensual de *NDVI* para el periodo comprendido entre julio de 1981 y agosto de 1994. Los datos, que cuentan con una resolución espacial de 8 km, han sido obtenidos del sensor "Advanced Very High Resolution Radiometer", (AVHRR) del satélite Landsat de la Administración Nacional del Océano y la Atmósfera (NOAA) de los Estados Unidos. Ver detalles en el URL ftp://daac.gsfc.nasa.gov/data/avhrr/global_8km.

El rango de valores para el *NDVI* varía entre -1 y 1. De ellos, sólo los valores positivos corresponden a zonas de vegetación. Los valores negativos, generados por una mayor reflectancia en el rango visible que en el rango infrarrojo, pertenecen a nubes, nieve, agua, zonas de suelo desnudo y rocas. El valor del *NDVI* puede variar en función del uso de suelo, la situación hídrica del territorio y el ambiente climático de la zona. En el presente trabajo se escaló este valor del *NDVI* en el rango de 0 a 200, donde cada valor representa el 1% del rango posible de datos [Eidenshink y Faundeen (1994)].

Para complementar los análisis, se usó información de precipitación a escala geográfica de 0.2° de arco, que

incluye toda la cuenca Amazónica y comprende el período de enero de 1972 a diciembre de 1992, con resolución mensual. La información se obtuvo de del proyecto Earth Observing System-Amazon Project (EOSAP), de la Universidad de Washington y del Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE) de Brasil. Ver los detalles en <http://www-cosdis.ornl.gov/>.

Para realizar los análisis de escalamiento a los campos de *NDVI*, se identificó una región cuadrada (lado de 2.048 km), inscrita dentro de la cuenca del Amazonas. La Figura 1 muestra la localización geográfica de la zona de estudio.

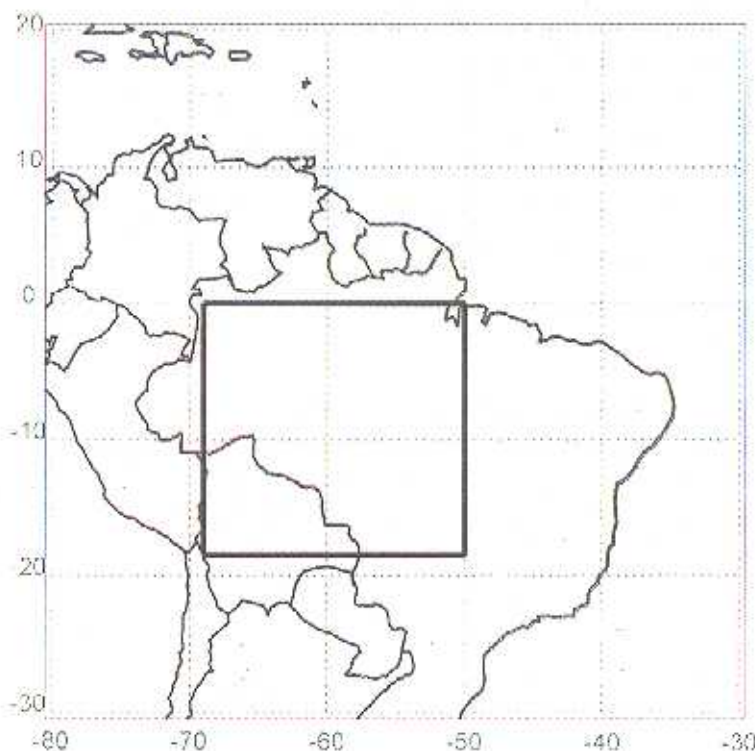


FIGURA 1.

Localización de la cuenca del Rio Amazonas en Suramérica (izquierda) y localización de la zona de estudio marcada con un cuadro (derecha).

Para caracterizar y cuantificar la dependencia de la variabilidad espacial del campo de *NDVI* con respecto a la escala, se utilizaron herramientas de cuantificación de las propiedades estadísticas de escalamiento simple y múltiple de campos aleatorios, tales como el espectro de potencias de Fourier en dos dimensiones y el análisis del escalamiento de los momentos. A continuación se describe brevemente cada método.

2.1. Espectro de Potencias bi-dimensional

El espectro de potencias de Fourier es una herramienta simple y conceptualmente muy potente para analizar la variabilidad espacial en un amplio rango de escalas. Este se calcula usando algoritmos de la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Cuando se trabaja con datos en varias

dimensiones, es necesario calcular el espectro de energía como una función de $|k|$, la magnitud del vector del número de onda. Esto se hace calculando la FFT y promediando la energía en círculos de diámetro $|k|$. Para esto se debe realizar una representación discreta del promedio circular, y producir el espectro de potencias isotrópico, $F(k)$ con $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$.

En general se define, para un amplio rango de escalas, la existencia de escalamiento o invarianza de escala si existe una variación lineal en el campo *log-log* del espectro de potencias en el espacio o el tiempo de la forma $F(k) \sim c(t)k^{-\beta(t)}$, donde k [L^{-1}] es el inverso de la escala, llamado como el número de onda. La pendiente

de la relación de escalamiento del espectro, β , es un indicador de la rugosidad de los campos, presentando mayores valores para campos con estructuras más correlacionadas [Harris et al. (2000)].

En general, el escalamiento simple de un proceso estocástico $X(t)$ significa que, $E[X^q(rt)] = r^{\theta q} E[X^q(t)]$, con $q = 0, 1, 2, 3, \dots$, ó, $\log E[X^q(rt)] = q\theta \log r + E[X^q(t)]$. Esta última ecuación muestra dos rasgos que son: (i) linealidad en el espacio log-log, y (ii) crecimiento lineal de la pendiente con el orden del momento, q , es decir $\tau(q) = \theta q$. El análisis de momentos de un campo bidimensional, denotado por X , es calculado para un rango de escala r (altos valores de r implica pequeñas escalas) mediante la relación [Deidda et al. (1999)],

$$M_q(r) = \langle |X(r)|^q \rangle \sim r^{-\tau(q)} \quad (2)$$

donde q es el orden del momento y $\langle \cdot \rangle$ denota el promedio sobre todos los pixeles de escala r en el campo. Típicamente la escala de la imagen es reducida desde su tamaño original por promedios espaciales del campo con un factor de 2 en cada paso. La linealidad de la función $M_q(r)$ vs. r , en el espacio log-log, provee una prueba de

la hipótesis del tipo de escalamiento (simple o múltiple) de los momentos y provee información de la intermitencia del campo. En la naturaleza se han encontrado diversos fenómenos en los cuales, a pesar de conservarse la relación de los momentos en diferentes escalas en cada orden, no se presenta la relación lineal entre el orden de los momentos y los diferentes valores de la pendiente, $\tau(q)$, en tal caso se presenta escalamiento múltiple. Esto tiene implicaciones para el entendimiento de la variabilidad espacial de los campos aleatorios y para el entendimiento de la dinámica de los procesos hidro-ecológicos que se desarrollan en la cuenca Amazónica, la más importante del mundo por su tamaño y por sus características hidrológicas, ecológicas y climáticas.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Espectro de Potencias bi-dimensional

En la Figura 2 se muestra el campo de *NDVI* en la región de estudio durante el mes de julio de 1981, agregando los datos de resolución de 8 km a una resolución espacial de 32 km. A partir de la información original de *NDVI*, se estimó el espectro espacial de Fourier y la función de momentos.

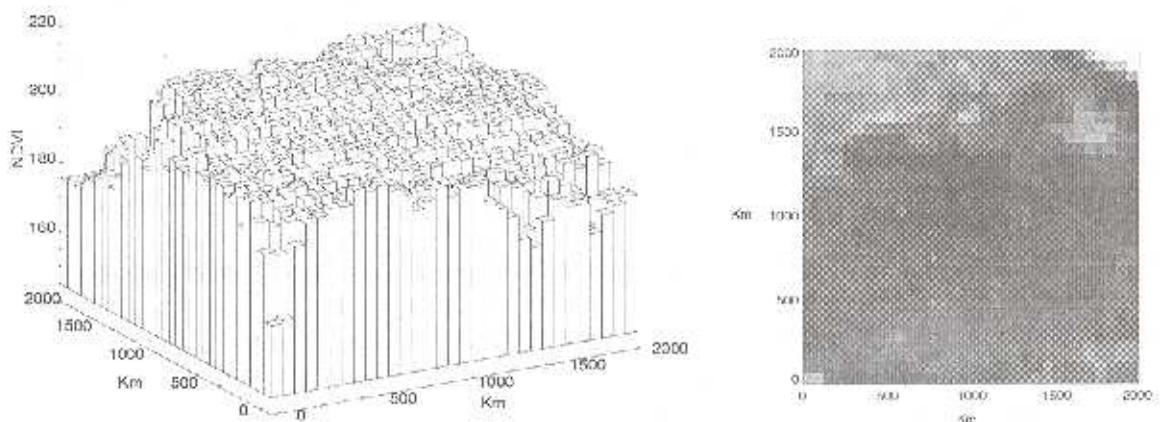


FIGURA 2. Distribución promedio del campo de *NDVI* para el mes de julio de 1981. Se muestra la distribución en 3D (izquierda) y en planta (derecha), con los datos de 8 km agregados a 32 km.

El espectro de potencias del campo de *NDVI* para el mes de Noviembre de 1989, se muestra en la Figura 3. Con el fin de encontrar algún ciclo anual en los valores de la pendiente de la relación de escalamiento del espectro, β , y el prefactor, se calculó el espectro de potencias para todos los meses disponibles (julio de 1981 a agosto de

1994). Se considera entonces que los 158 valores son una muestra significativa para concluir acerca de la periodicidad de este factor que debe estar fuertemente influenciada por la dinámica hidro-ecológica en la Amazonía, que interactúa dentro de los balances de energía, agua y Carbono.

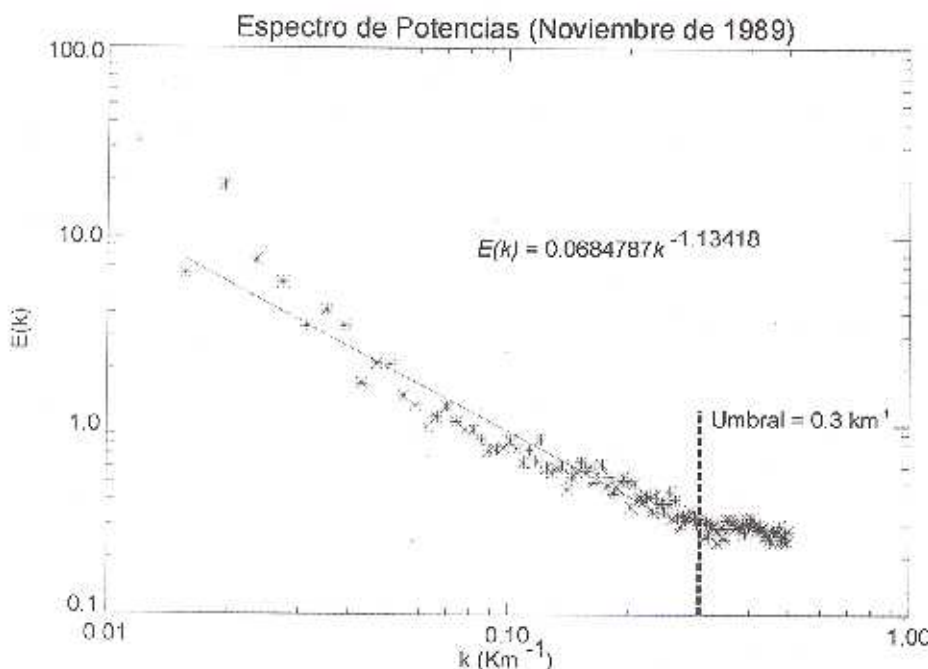


FIGURA 3. Espectro de potencias para Noviembre de 1989. Se muestra la ecuación de ajuste lineal en el espacio log-log ($b = 1.13$).

Del total de meses analizados para los campos de *NDVI*, se encontró que el comportamiento del espectro se puede dividir en dos zonas, dependiendo del valor del exponente de escalamiento. El valor de este umbral es de 0.3 km^{-1} (Figura 3). Para números de onda menores 0.3 km^{-1} (valores mayores a 24 km) el exponente de escalamiento exhibe valores diferentes de cero, y para números de onda mayores (escalas espaciales más pequeñas) el espectro se vuelve independiente del número de onda, de tal forma que la pendiente es muy pequeña o, en muchos casos, nula. Este comportamiento generalizado se observa para todos los meses analizados. Este umbral fue usado como criterio para la estimación de los exponentes y los prefactores en los campos de *NDVI*.

El hecho de obtener una pendiente tan pequeña en números de onda más grandes (escalas más pequeñas), muestra la estructura tan poco correlacionada que tiene el *NDVI* en estas escalas. Podría pensarse que a esas escalas, las fluctuaciones pueden ser vistas como ruido blanco, cuyo espectro de potencias tiene pendiente nula.

En general se encontró una alta correlación entre el exponente β y el prefactor de la regresión lineal con los valores de la media y la desviación estándar de los campos de *NDVI*, lo que conduce a pensar que el ciclo anual del exponente β está relacionado con las condiciones medias del campo de *NDVI*, lo que a su vez está condicionado por factores climáticos. En las Figuras 4 y 5 se observan estos rasgos característicos para los años de 1982 a 1993.

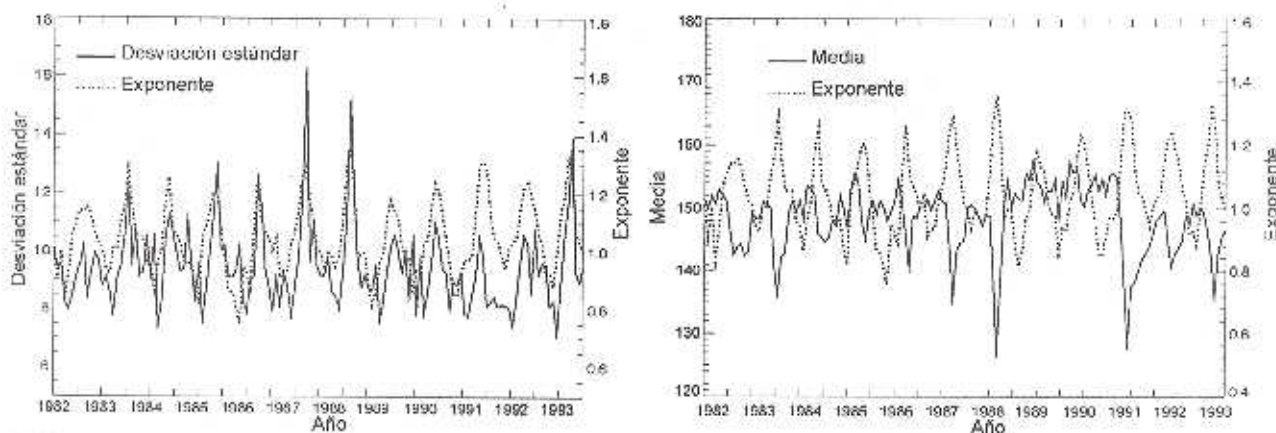


FIGURA 4. Relación del exponente β con la desviación estándar de los campos de *NDVI* (izq.) y la media de los campos de *NDVI* (der.) para los años de 1982 a 1993.

En los datos de *NDVI* se encuentra una relación inversa entre el exponente β y la media de los datos (coeficiente de correlación -0.55 , con un nivel de significancia de 95%), y una relación directa con la desviación estándar (coeficiente de correlación de 0.6 , con un nivel de significancia de 95%), y por tanto una relación inversa entre la media y la desviación estándar (Figura 4). También se observa una relación inversa y un marcado ciclo anual del exponente β y el prefactor (Figura 5). Se

evidencia también en la Figura 4, que los valores medios y la desviación estándar están influenciados por eventos macroclimáticos como se observa en el comportamiento del valor medio del *NDVI* para los años de 1988-1989 (año de ocurrencia de La Niña) y 1992 (año de ocurrencia de El Niño). El coeficiente de correlación entre el exponente y el prefactor es de -0.8 , según la prueba *t-student* con un nivel de significancia de 0.95 .

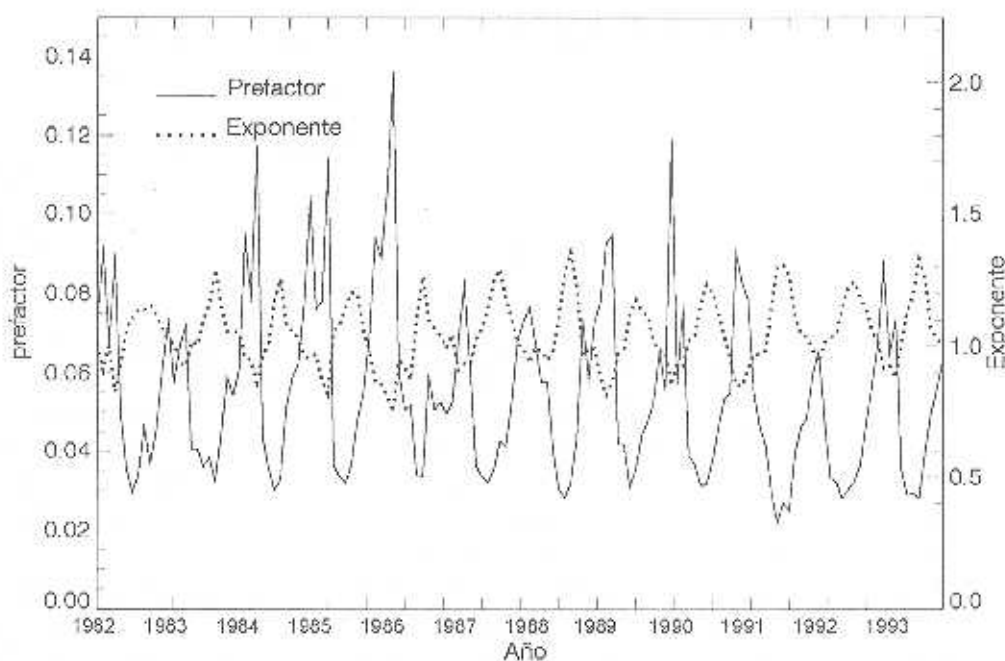


FIGURA 5. Evolución temporal de los valores del prefactor y del exponente β obtenidos del ajuste del espectro de potencias entre 1982 y 1993, de los datos de *NDVI*.

La correlación entre el exponente y el prefactor de -0.8 , pone de presente que en procesos de escalamiento el prefactor no está desligado del exponente de escalamiento, tal como se ha demostrado con respecto al llamado "fenómeno de Hurst" en series de tiempo geofísicas [Poveda (1987), Mesa y Poveda (1993)]. Este vínculo entre exponente y prefactor involucra y sintetiza la complejidad de las relaciones físicas de la dinámica hidrológica, ecológica y vegetal de la Amazonía. El significado de estos valores de los exponentes y de la alta correlación de estos con los prefactores queda abierto como reto a la investigación, pero es indudable que en tales relaciones se manifiestan los procesos físicos que gobiernan el comportamiento de la Amazonía. Las relaciones de escalamiento para la varianza de campos aleatorios han jugado un papel fundamental en el entendimiento de fenómenos como la turbulencia totalmente desarrollada [Kolmogorov (1941, 1962)]. El

famoso exponente $(-5/3)$ del espectro de la turbulencia contiene una explicación fundamental sobre la turbulencia, que Kolmogorov descifró con base en el análisis dimensional y aplicación del Teorema Pi. Análogamente debe buscarse el entendimiento de la dinámica del *NDVI* y de los campos hidro-ecológicos.

El ciclo anual del exponente β también presenta una correlación muy fuerte con el ciclo anual de precipitación en la Amazonía. Es sabido que ésta presenta un carácter unimodal durante el año, con un periodo de lluvias entre noviembre y marzo y un periodo de sequía de mayo a septiembre. Esta relación se puede ver reflejada en el alto coeficiente de correlación (-0.77) entre estas dos series. La Figura 6 muestra el alto grado de correlación simultánea entre las dos series. Es necesario profundizar la investigación en esta dirección, dadas las importantes implicaciones de este resultado, pues la precipitación es

una variable fundamental en la dinámica de la actividad vegetal, pero lo que sorprende es el fuerte vínculo existente entre el valor medio de la precipitación sobre la cuenca y el exponente del espectro de Fourier bidimensional del campo de *NDVI*. Este alto grado de correlación es altamente sorprendente ya que la

correlación entre el valor medio de precipitación y el valor medio de *NDVI* presenta un valor máximo de 0.55 con dos meses de rezago y una correlación simultánea de 0.27. Es necesario develar el origen físico de la síntesis estadística que proporciona la alta correlación entre la precipitación y la pendiente del espectro.

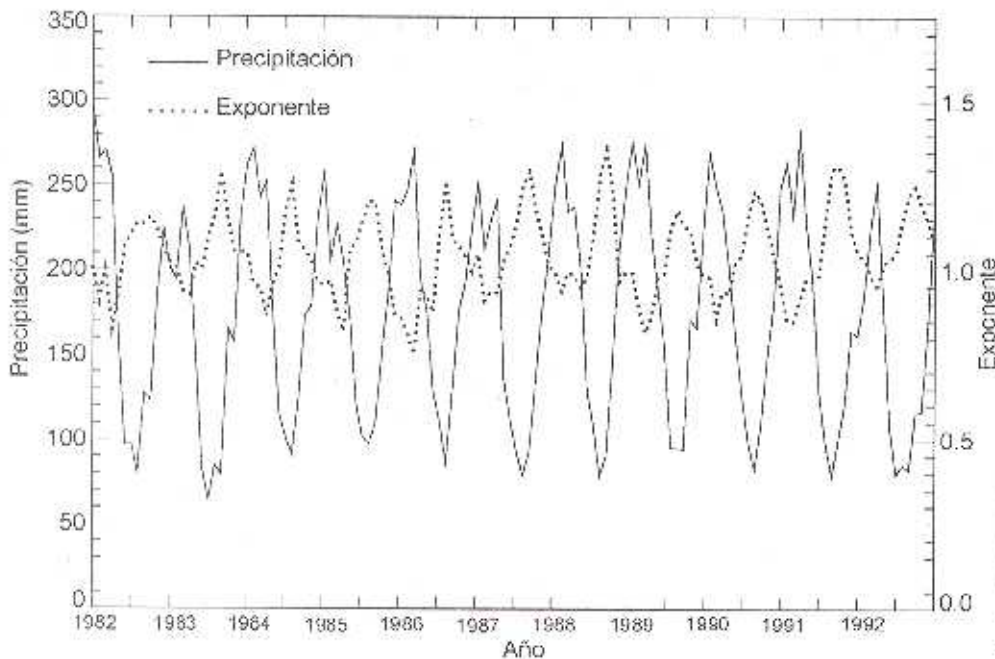


FIGURA 6.

Evolución temporal del valor medio de la precipitación en la zona de estudio y del exponente β para el campo de *NDVI*, en el período 1982 al 1992.

Teniendo en cuenta que el valor medio del *NDVI* está influenciado por el fenómeno ENSO sobre la Amazonía (Poveda et al. (2001), y Figura 4 de este trabajo), se estudio el ciclo anual de la evolución del exponente β para los años 1989 (considerado año La Niña), el año 1992 (considerado año El Niño), y el promedio de los datos (Figura 9).

En la Figura 7 se observa el comportamiento del exponente β para las dos fases estudiadas del fenómeno ENSO. Las diferencias más grandes se identifican durante el primer semestre, cuando las dos fases del ENSO se encuentran en su mayor amplitud y efecto. Se concluye entonces que el exponente β también está fuertemente influenciado por fenómenos macroclimáticos como el ENSO, al igual que el valor medio del campo de *NDVI*, presentando estructuras más correlacionadas (pendientes más altas) para años El Niño que para años La Niña.

La cuenca Amazónica presenta sequías durante la ocurrencia de El Niño [Marengo (1992), Marengo y Hastenrath (1993), Richey et al. (1989) y Obregón y Nobre (1990), Poveda y Mesa (1997), Poveda et al. (2001)], y por tanto la disminución en la actividad vegetal que representa el índice del *NDVI*, ocurre en una gran escala, con mayor coherencia espacial que en épocas normales o de La Niña.

3.2 Análisis de Escalamiento de los Momentos

Para estudiar el comportamiento del escalamiento de los momentos se emplea la ecuación (2), usando los datos de *NDVI*. En la Figura 8 se presentan los resultados para el mes de abril de 1992, incluyendo los ajustes de la función marginal de momentos para valores de q entre 0.5 y 4 (superior) y el gráfico de la pendiente $\delta(q)$ en función de q (inferior).

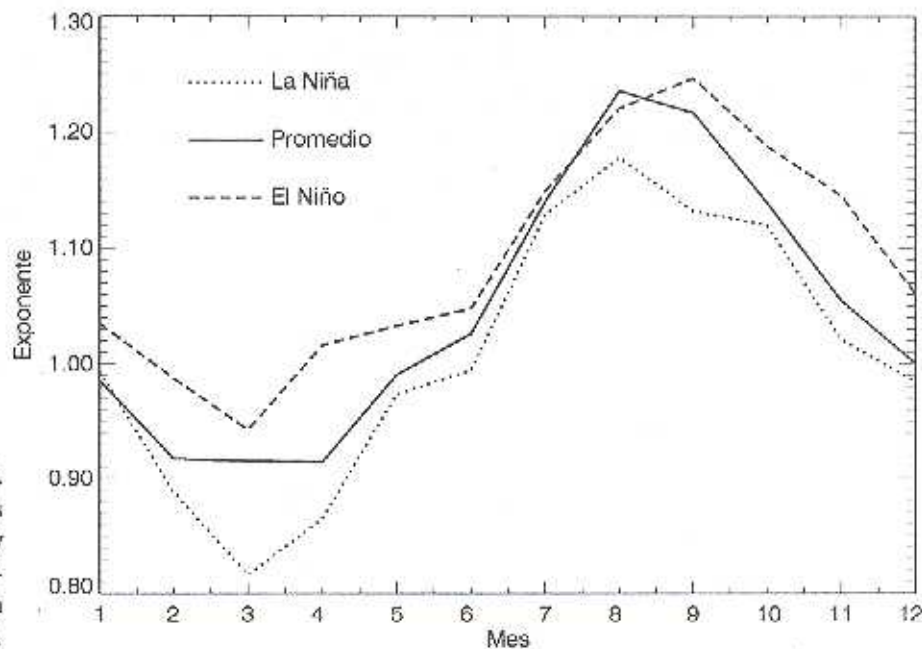


FIGURA 7. Valores del exponente β para los años 1989 (La Niña), 1992 (El Niño) y promedio multianual del período 1982-1993, obtenidos de los mapas con resolución espacial de 8 km.

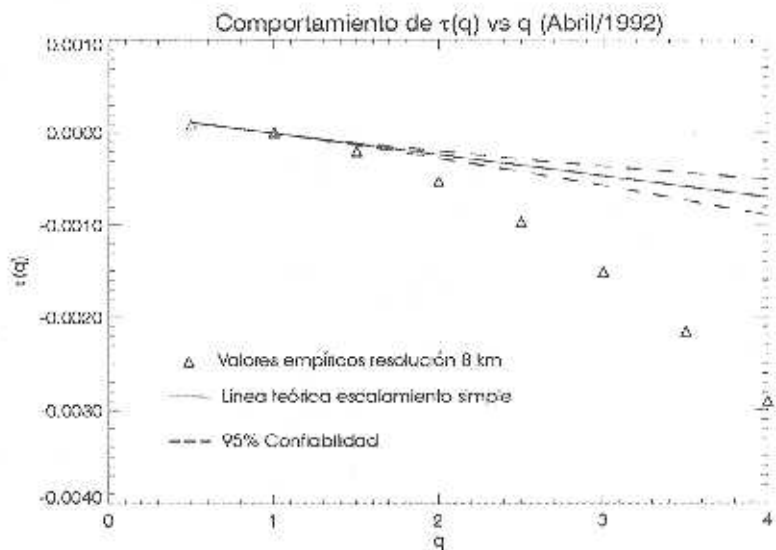
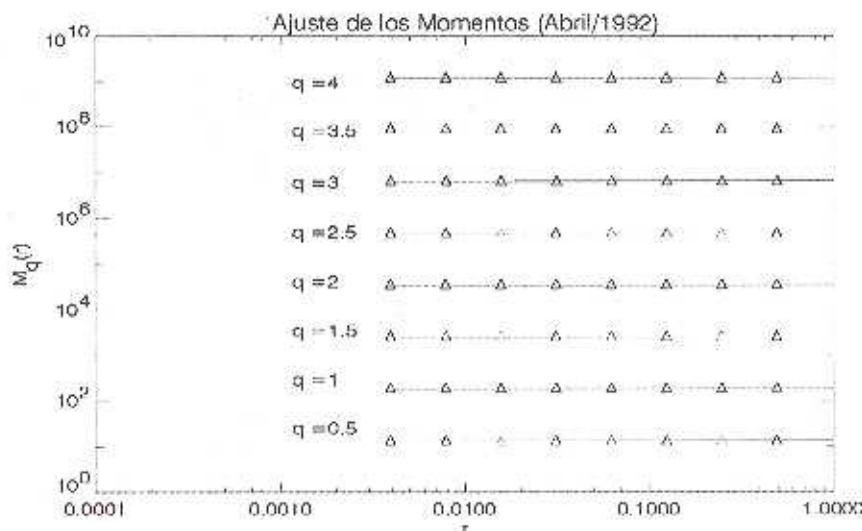


FIGURA 8. (Arriba) Escalamiento de la función marginal de momentos ($q=0.5, 1.0, 1.5, \dots, 4$), para el campo de *NDVI*. La línea sólida fue estimada mediante regresión de mínimos cuadrados. (Abajo) Comportamiento de $\tau(q)$ vs. q . La línea recta sólida representa el ajuste de escalamiento simple. Las líneas punteadas denotan los intervalos de confianza de 95%.

Los resultados obtenidos evidencian la presencia de escalamiento múltiple, ya que los valores de $\tau(q)$ no se comportan con una función lineal de q , tal como se observa en la Figura 8 (inferior), lo que permite rechazar la hipótesis de escalamiento simple en el campo de *NDVI*.

4. CONCLUSIONES

La cuantificación de la estructura espacial de los campos de *NDVI* es fundamental para el entendimiento de la variabilidad espacio-temporal de la vegetación, en una región de tanta importancia hidro-climática y ecológica como la Amazonia. El uso de información de *NDVI* con alta resolución espacial y temporal proporciona una herramienta muy poderosa de diagnóstico y modelación, tal como se ha demostrado en este trabajo, mediante el análisis de la variabilidad anual e interanual de los patrones de escalamiento espacial del *NDVI*. Los principales resultados de este trabajo se resumen en los párrafos siguientes.

El análisis del espectro de Fourier bi-dimensional permitió identificar un comportamiento de la forma $E(k) = c(k)k^{-\beta}$, con dos regiones en el espectro de potencias, separadas en la escala de 24 km, por encima del cual el exponente de escalamiento se comporta como $2 < \beta < 0$, lo cual sintetiza una persistencia espacial de largo alcance (ruidos $1/f^\alpha$ [Mandelbrot (1998)], y por debajo del cual $\beta = 0$ (nivel de ruido).

Se encontró que la evolución mensual del exponente de escalamiento del espectro, $\beta(t)$, exhibe una relación inversa con el valor medio mensual del campo de *NDVI*, y una relación directa con la desviación estándar de los campos de *NDVI*. Además, el valor estimado de $\beta(t)$ presenta valores mayores para los meses considerados de menor precipitación, especialmente los meses de agosto, septiembre y octubre. Esto indica la presencia de estructuras más organizadas y de mayor persistencia espacial en los campos de *NDVI* durante las épocas más secas, lo cual pone de presente el alcance espacial de las sequías, por oposición a la mayor variabilidad espacial que impone la precipitación durante las épocas de lluvia.

Otro hallazgo significativo lo constituye el alto coeficiente de correlación negativo encontrado entre la precipitación mensual sobre la Amazonia y los valores mensuales estimados de $\beta(t)$, para el campo de *NDVI*, lo cual indica profundizar la pesquisa en tal dirección.

La variabilidad hidro-climática de escala interanual también produce una huella sobre el exponente $\beta(t)$. Durante las dos fases del ENSO se encontró que tanto la media de los campos de *NDVI* como los valores del exponente $\beta(t)$ son mayores durante los eventos de El Niño, que durante los eventos de La Niña. Este resultado proviene de la alteración de los patrones hidro-ecológicos en la Amazonia durante las dos fases del ENSO. Los resultados de estos análisis de escalamiento deberán servir de base para explicar la dinámica hidro-ecológica en distintas escalas de espacio y tiempo para los campos de *NDVI* del Amazonas.

El análisis del escalamiento de los momentos permitió identificar que la variabilidad del *NDVI* obedece leyes de escalamiento múltiple. Esto se deduce al observar el alejamiento de los valores de los exponentes con respecto al comportamiento lineal que exige el escalamiento simple entre el orden de los momentos y el exponente de escalamiento. El comportamiento de escalamiento múltiple sugiere que la intermitencia (espacial) de las escalas más pequeñas tiene un peso muy importante en la dinámica de la actividad vegetal, en forma análoga a lo que sucede con la turbulencia completamente desarrollada, y sus desviaciones de las predicciones de la teoría de Kolmogorov (1941, 1962).

Los anteriores resultados permiten una mirada inicial al estudio de la evolución temporal de la variabilidad en el espacio de los campos de *NDVI*, un parámetro fundamental de la dinámica de procesos hidrológicos y ecológicos en la Amazonia.

5. REFERENCIAS

- Deidda, R., R. Benzi, y F. Siccardi. 1999. Multifractal modeling of anomalous scaling laws in rainfall, *Water Resour. Res.*, 35, 1853-1867.
- Eidenshink, J.C., y J.L. Faundeen. 1994. The 1 km AVHRR Global Land Data Set: First stages in implementation, *Intern. Jour. Rem. Sens.*, 15, 3443-3462.
- Gutman, G. G., Bio-climates of South America as derived from multispectral AVHRR data. 1991. 24th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Rio de Janeiro. Ann Arbor, Michigan, Environmental Research Institute of Michigan.
- Harris, D., E. Fourfoula-Georgiou, K. Droegemeier, y J.

- Levitt, 2000. Multi-Scale statistical properties of a high-resolution precipitation forecasts, *J. Hydromet.*, 2(4), 406-418.
- Hess, T. M., W. Stephens, y G. Thomas. 1996. Modelling NDVI from decadal rainfall data in the north east arid zone of Nigeria. *J. Environ. Manag.*, 48, 249-261.
- Kogan, F. N., y J. Sullivan. 1993. Development of global drought watch system using NOAA/AVHRR data, *Adv. Space Res.*, 13, 219-222.
- Kolmogorov, A. N. 1941. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluids for very large Reynolds numbers. *Doklady Academie des Sciences de l'URSS*, 30, 301-305.
- Kolmogorov, A. N. 1962. A refinement of previous hypotheses concerning the local structure of turbulence in a viscous incompressible fluid at high Reynolds numbers, *Jour. Fluid Mech.*, 13, 82-85.
- Mandelbrot, B. B. 1998. *Multifractals and 1/f noise. Wild self-affinity in Physics (1963-1976)*, Selecta Volume N. Springer-Verlag, New York, 442 pp.
- Marengo, J. 1992. Interannual variability of surface climate in the Amazon basin, *Intern. Jour. Climatol.*, 12, 853-863.
- Marengo, J. A., y S. Hastenrath. 1993. Case studies of extreme climatic events in the Amazon basin, *J. Climate*, 6, 617-627.
- Mesa, O. J., y G. Poveda. 1993. The Hurst Effect: The scale of fluctuation approach, *Water Resour. Res.*, Vol. 29, No. 12, 3995-4002.
- Nicholson, S. E., A. R. Lare, J. A. Marengo, y P. Santos. 1996. A revised version of Lettau's evapoclimatology model. *Jour. Appl. Meteor.*, 35, 549-561.
- Obregon, G. O., y C. A. Nobre. 1990. Principal component analysis of precipitation fields over the Amazon river basin, *Climanálise*, 5, 35-46.
- Poveda, G. 1987. El Fenómeno de Hurst. Tesis Magister en Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Poveda, G., y O.J. Mesa. 1997. Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large-scale ocean-atmospheric phenomena, *J. Climate*, 2690-2702.
- Poveda G., A. Jaramillo, M. M. Gil, N. Quiceno, y R. Mantilla. 2001. Seasonality in ENSO-related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index in Colombia, *Water Resour. Res.*, 37, 2169-2178.
- Richey, J. E., C. Nobre, y C. Deser. 1989. Amazon river discharge and climate variability: 1903 to 1985, *Science*, 246,101-103.
- Seevers, P. M., y R.W. Ottmann. 1994. Evapotranspiration estimation using a normalized difference vegetation index transformation of satellite data, *Hydrol. Sci. Jour.*, 39, 333-345.
- Szilagyi, J., D. C. Rundquist, D. C. Gosselin, y M. B. Parlange. 1998. NDVI relationship to monthly evaporation, *Geoph. Res. Lett.*, 25, 1753-1756.
- Tarpley, J. D., S. R. Schneider, y R. L. Money. 1984. Global vegetation indices from NOAA-7 meteorological satellite, *J. Climate and Appl. Meteor.*, 23, 491-494.
- Tucker, C. J., y B. J. Choudhury. 1987. Satellite remote sensing of drought conditions, *Rem. Sens. Environ.*, 23, 243-251.