

Análisis de patrones espacio-temporales de la estructura de la vegetación en ecosistemas mediterráneos a distintas escalas

M. García (*), A. Palacios-Orueta (**), y S. L. Ustin (***)

(*) *ETSIA. Universidad Politécnica de Madrid. Dpto. Ingeniería Rural. Avda Complutense s/n. Madrid 28040.*

(**) *Dpto. Geografía. Universidad de Alcalá. C/Colegios 2. Alcalá de Henares. 28801 Madrid.*

(***) *Center for Spatial Technologies and Remote Sensing (CSTARS). Univ. of California, Davis. 95616 Davis, CA. USA.*

RESUMEN

El objetivo del presente estudio es la caracterización de patrones espaciales y temporales de las variables de estructura de la vegetación en ecosistemas mediterráneos y a distintas escalas. Se utilizaron datos de teledetección de un sensor: hiperespectral (AVIRIS) y de dos multispectrales (TM y AVHRR). Se observó que la dependencia espacial varía según el tipo de vegetación, escala, sensor y la climatología anual y estacional. Los patrones temporales detectados a gran escala y baja resolución son coherentes con la fenología y la variabilidad climática interanual, aunque no detectan cambios a escalas más finas. Los resultados presentan implicaciones para el estudio del cambio global, la estabilidad de ecosistemas y problemas de escala entre otros.

PALABRAS CLAVE: variabilidad, cobertura vegetal, escala, semivariograma, ecosistema mediterráneo, AVIRIS (Airborne, Visible Infrared Imaging Spectrometer).

ABSTRACT

The objective of the present study is the characterization of spatial and temporal patterns in vegetation structure variables at different scales in Mediterranean ecosystems. Hyperspectral (AVIRIS) and multispectral (TM and AVHRR) remote sensing data were used. Spatial dependence varies according to vegetation type, spatial scale, sensor and seasonal and annual climatology. Temporal patterns detected at greater extents and coarse resolution are coherent with phenological trend and inter-annual climatic variations, although changes at smaller lags are missed. The results of this paper have implications for global changes studies, ecosystem stability and scaling issues, among others.

KEYS WORDS: variability, vegetation cover, scale, semivariogram, mediterranean ecosystem, AVIRIS (Airborne, Visible Infrared Imaging Spectrometer).

INTRODUCCIÓN

El estudio del funcionamiento de los ecosistemas y de sus respuestas ante presiones ambientales es de gran importancia para predecir efectos a largo plazo e integrar las actividades humanas en el funcionamiento de los mismos. Sin embargo, la investigación de las relaciones-origen efecto supone un reto para la comunidad científica debido a la complejidad de los ecosistemas donde multitud de procesos operan a distintas escalas temporales y espaciales (Levin, 1993).

Mediante el estudio de la Productividad Primaria Neta (NPP) y su evolución temporal se pueden extraer conclusiones sobre la dinámica y estabilidad de un ecosistema y su relación con eventos climáticos (Hobbs, 1990; Field et al., 1992). Esto se puede llevar a cabo, caracterizando los patrones

espaciales y temporales de parámetros relacionados con la estructura de la vegetación. Se ha postulado en la teoría jerárquica de ecosistemas (O'Neill et al., 1999) que los patrones detectados en el paisaje son la consecuencia de interacciones no lineales entre las componentes biótica y abiótica de un ecosistema, existiendo una jerarquía de procesos reflejada en una jerarquía de patrones. Así, patrones a gran escala serían el resultado de procesos o factores que imponen patrones sobre la comunidad vegetal actuando a gran escala como: suelo, geomorfología, altitud, microclima y los patrones observados a escalas locales serían el resultado de procesos como: diferencias en contenido de humedad del suelo, competencia, etc.

Por tanto, los patrones detectados responden a la variabilidad de origen sistemático presente en un ecosistema, y se puede llegar a conocer los proce-

Los procesos que los producen de una forma más directa que en el caso de la variabilidad de origen aleatorio o caótico. La relación entre la variabilidad aleatoria y sistemática detectadas para una variable específica está en función de la escala a la que se mide (Schimel et., al 1997). Como consecuencia, los valores de NPP detectados pueden presentar distintos grados de variabilidad espacial dependiendo del tipo de muestreo (Levin, 1993, Lambin, 1996).

La geostatística está siendo utilizada como herramienta para detectar y modelizar patrones relacionados con la variabilidad espacial. Se fundamenta (Burrough y MacDonell, 1998) en la estimación de la correlación espacial de una variable o entre varias de ellas. El problema siguiente es la identificación del significado ecológico de los factores que operan a cada escala. La comparación con la dependencia espacial de factores ambientales a distintas escalas puede contribuir a desvelar los procesos subyacentes. La aplicación de estas técnicas también abre la posibilidad de determinar variables que se comporten de forma consistente a través de distintas escalas, lo que es necesario para relacionar procesos y crear modelos escalables (Levin, 1993).

La teledetección juega un papel fundamental en la estimación de variables relacionadas con la estructura vegetal cuando se trabaja en grandes extensiones (Tucker et al., 1977), abriendo enormes posibilidades para la aplicación de distintos tipos de modelos a nivel global, regional o local que funcionan con variables a varias escalas. Aunque estas técnicas proveen de una gran cantidad de información uniformemente distribuida, la resolución espacial es generalmente menor que la utilizada en estudios de campo. Por ello, es importante conocer como afecta la degradación de la resolución espacial, y no perder información debido al promedio de la signatura espectral realizado en un pixel (Ustin et al., 1997). Por otro lado, si la variabilidad dentro de los pixeles es baja o siendo alta es aleatoria, una menor resolución espacial puede no afectar o incluso mejorar la capacidad para detectar cambios. El factor tiempo es otro aspecto a tener en cuenta, ya que si las tendencias temporales no están espacialmente correlacionadas, una degradación de resolución si afectaría la detección de cambios.

En cuanto a la resolución espectral, sensores hiperspectrales como AVIRIS (Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer), que recogen mucha más información sobre una superficie gracias al alto número de bandas espectrales contiguas y un mayor SNR (Signal to Noise ratio), estiman con mayor precisión variables relacionadas con la cobertura vegetal, lo que permite detectar cambios más finos (García et al., 2001).

El objetivo de este estudio es explorar los efectos del cambio de escala sobre la detección de la varia-

bilidad espacial y temporal de parámetros de estructura de la vegetación, con el propósito de avanzar en el conocimiento de los factores que actúan a cada nivel espacial y su evolución temporal. En última instancia se pretende establecer un marco para cuantificar los factores más significativos en la varianza observada en el paisaje de forma que se pueda optimizar la elección de sensor, así como la fecha de adquisición de la imagen en función de los objetivos perseguidos.

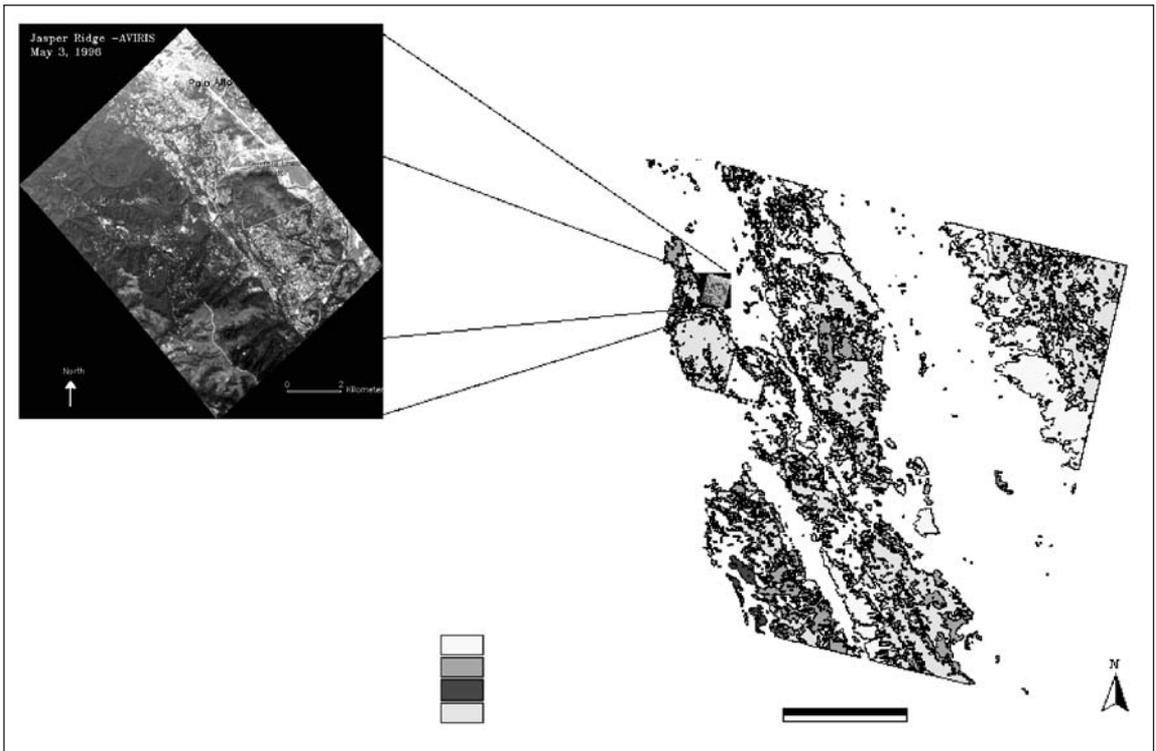
El estudio se ha realizado a distintas escalas utilizando imágenes adquiridas por sensores de distinta resolución en dos extensiones de análisis. La zona de estudio está situada en la zona Mediterránea de California caracterizada por una alta variabilidad en el régimen de precipitación y un período de sequía estival (Mooney et al., 1974), siendo la disponibilidad de agua el principal factor limitando la NPP (Miller et al., 1983).

Una hipótesis es que la relación entre variabilidad y escala está directamente relacionada con la variable tiempo, ya que ésta lleva asociada cambios en la distribución espacial del recurso más limitante. Estos cambios en distribución se recogen como cambios en NPP en mayor o menor grado según la especie vegetal. El estudio de la intensidad y fecha de estas respuestas o variaciones según distintas comunidades, y su propagación a través de distintas escalas, son aspectos que se pretenden aclarar en este estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de análisis se localiza en las estribaciones este de las Montañas de Santa Cruz, California (USA) (Figura 1) y comprende una extensión de 184 por 280 km, estando incluida en este área la Reserva Biológica de Jasper Ridge (JRBP) de 500 ha. Con objeto de identificar los tipos de vegetación existentes se utilizaron dos mapas de cobertura del suelo: el correspondiente a las montañas de Santa Cruz a escala 1:250,000 del USGS (United States Geographical Survey), y el perteneciente a la reserva JRBP con tamaños mínimos de polígono de 100 m². Ambos presentan los mismos tipos de vegetación mediterránea: chaparral, pradera, bosque caducifolio y bosque perenne.

El estudio se realizó a lo largo de un periodo de tiempo que comprende desde 1990 hasta 1998. La climatología es típica mediterránea con una precipitación media de 706 mm, siendo la de 1992 menor que la media, la de 1996 igual a la media y mayor que la media la de 1998 y siendo 1990 el año más seco de todos.



* **Figura 1.** Zona de estudio: Montañas de Santa Cruz, California (USA).

El conjunto de datos está compuesto por tres tipos de imágenes, a distintas resoluciones espacial, espectral y temporal:

- Datos del sensor AVHRR sobre Santa Cruz, con resolución en nadir de 1.1 km. Se utilizó una serie temporal desde 01-01-1994 hasta 31-12-1998.
- Datos de AVIRIS sobre JRBP con resolución espacial de 20 m y 224 bandas comprendidas entre 400 y 2500 nm. Las fechas de adquisición son: 2-Junio-1992, 3-Mayo-1996 y 29-Abril-1998.
- Una imagen de TM (Thematic Mapper) sobre JRBP, con resolución espacial de 30 m, del 20 de Junio de 1990.

Variables utilizadas: NDVI y Fracciones de mezcla

Para optimizar las posibilidades de cada sensor en cuanto a la detección de variaciones en la cobertura vegetal se utilizaron variables distintas según sus capacidades: NDVI o fracciones de mezcla.

Se empleó el NDVI proveniente de los datos AVHRR en Santa Cruz y el NDVI calculado de la

escena de TM del 1990 previa aplicación de la corrección de Guyot y Gu (1994) en JRBP.

En diversos estudios se ha comprobado la alta correlación entre la integral del NDVI anual y la NPP sobre la superficie (ANPP), que es un indicador integrador del funcionamiento de ecosistemas relacionado con la precipitación anual (Paruelo y Lauenroth, 1995) y es además función de la Radiación Activa Fotosintética (PAR). Sin embargo esta relación entre NDVI y ANPP, sólo es válida en condiciones de no estrés y cuando existe una convergencia funcional entre flujos fotosintéticos y estructura del dosel (Gamon et al 1995).

En el caso del sensor hiperespectral AVIRIS, se utilizaron fracciones de vegetación verde obtenidas mediante modelos lineales de mezcla en el área de Jasper Ridge (García, et al., 2001 y Ustin et al., 1997), donde se emplearon 3 ó 4 miembros puros, según el tipo de vegetación y fecha. Estos modelos, basados en la descomposición de la reflectancia observada en el píxel en fracciones de reflectancia de componentes puros del mismo, como vegetación verde, suelo y sombra, caracterizan la biomasa vegetal de forma más precisa que los índices de vegetación. Minimizan efectos de iluminación,

Todas las figuras precedidas de asterisco se incluyen en el cuadernillo anexo de color.

fondo, sensor, atmosféricos, o topográficos, separando la reflectancia que es debida sólo a la cobertura vegetal y además no se saturan a niveles altos de LAI (Índice de Área Foliar) como le ocurre al NDVI (Elmore et al., 2000).

Análisis de la variabilidad temporal

Para evaluar las tendencias en productividad primaria en los 4 tipos de vegetación: praderas, bosques perennes, caducifolios y chaparral a medio-largo plazo se analizaron series temporales de compuestos quincenales de NDVI medio del sensor AVHRR en la zona de las montañas de Santa Cruz. El estudio se realizó entre 01-01-1994 y 31-12-1998. El régimen de precipitación entre 1994-1998 es representativo de la variabilidad encontrada en lapsos de tiempo mayores. En el caso de los otros dos sensores, sólo se disponía de imágenes puntuales en distintas fechas.

Análisis de la variabilidad espacial

El análisis de la variabilidad espacial se llevo a cabo mediante el cálculo del semivariograma experimental (Burrough y MacDonell, 1998) calculado sobre imágenes de NDVI y fracciones vegetales para las tres combinaciones de sensor y extensión en distintas fechas.

El semivariograma es la función que relaciona la semivarianza con la distancia. Para obtener la semivarianza de una variable continua, se calcula en primer lugar, para todos los puntos de una muestra, la mitad de las diferencias medias entre el valor de la variable en un punto, y el de la variable en todos los puntos situados a una distancia (lag) fija. El valor de la semivarianza que se obtiene para cada distancia, es la suma de la semivarianza calculada para todos los puntos de la muestra y los que están dentro de ese intervalo de distancias.

En el gráfico de un semivariograma están representadas en el eje de abscisas las distancias o "lags" y en el eje de ordenadas la suma de las semivarianzas para todos los puntos y para cada una de las distancias. En general, en una muestra de datos con dependencia espacial, la semivarianza aumenta con la distancia hasta llegar a un punto donde se estabiliza debido a que ya no existe autocorrelación espacial.

Los parámetros que caracterizan un semivariograma son

- El alcance(range): distancia a la cual el valor semivariograma se estabiliza y normalmente se alcanza la máxima semivarianza.

- Umbral (sill): valor de la semivarianza en el rango.
- Semilla (Nugget): es la variabilidad debida a errores de medida o variabilidad presente a escalas menores que el intervalo de muestreo.

En este trabajo se calcularon de forma independiente los semivariogramas para cada uno de los tipos de vegetación con objeto de hacer una estratificación, como primer paso en la identificación del origen y la escala de la variabilidad detectada. Para cada comunidad vegetal se calcularon 12 semivariogramas (uno al mes) en el año 95/96 con las imágenes de AVHRR, aunque se seleccionaron sólo los más representativos. Se calculó un semivariograma con la imagen de TM, y 3 semivariogramas con datos de AVIRIS. Los semivariogramas de TM se escalaron según el coeficiente de variación para comparar con patrones detectados con AVIRIS en la misma extensión.

El lag o distancia utilizada en el cálculo del semivariograma se hizo coincidir con la resolución espacial de cada sensor.

Como la escala del análisis viene determinada por 2 parámetros: el grano (resolución o lag) y la extensión del área de estudio (Turner y Gardner, 1991), al muestrear con lags bajos (20 ó 30 m) en extensiones pequeñas (JRBP), se va a detectar variabilidad local (AVIRIS y TM), mientras que el cambio de escala que supone el muestreo con lags de 1000 m en mayores extensiones, cubiertas por AVHRR, permitirá la evaluación de patrones más globales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de la variabilidad temporal

En la Figura 2, se observa que los patrones de NDVI son indicadores razonables de la fenología de la cubierta vegetal. Las tendencias interanuales son similares en los cuatro tipos de vegetación y los patrones vegetales en esta región responden a niveles de precipitación entre Enero y Julio. El desfase entre la respuesta de la vegetación y la precipitación depende del tipo de vegetación, y el menor desfase corresponde a las hierbas, que también presentan una mayor respuesta al clima (Di, et al., 1994). La vegetación perenne muestra picos más extremos que la caducifolia, ya que en ésta última aparece la cubierta vegetal herbácea que alcanza máximos en invierno, momento en que la vegetación caducifolia aparece sin hojas. Se observa una reducción del ciclo fenológico de las praderas en años más secos

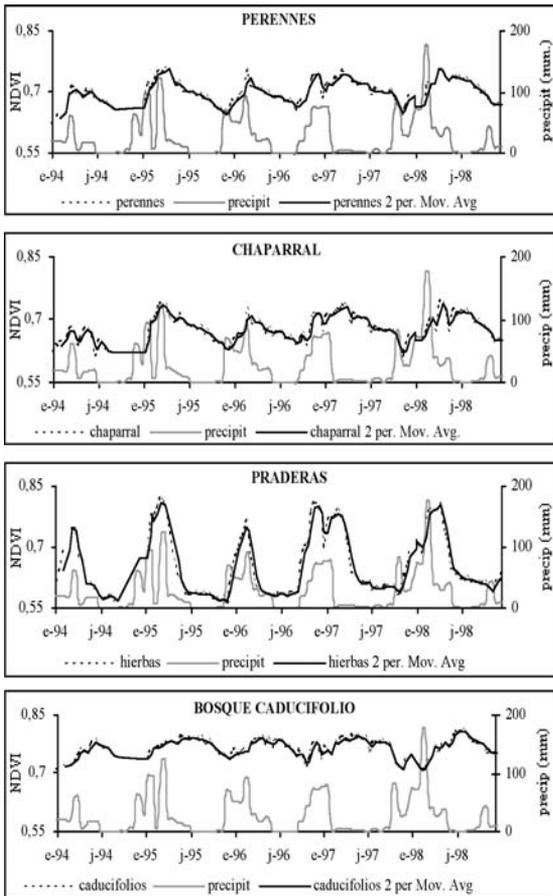


Figura 2. Series de tiempo de los valores medios de NDVI y precipitación para los años 1994-1998 para la zona de Santa Cruz.

(máximos a fines de Febrero) respecto a años húmedos en que se puede retrasar el máximo a fines de Marzo. El mismo patrón en cuanto a retrasos en el ciclo se observa en bosque caducifolio: máximos en Mayo en años secos y a primeros de Julio en año húmedos, sin embargo en chaparral y perennes los máximos son antes, hacia mitad de Abril, con menores variaciones entre años. Es importante tener en cuenta estos efectos fenológicos al realizar detección de cambios interanuales. El chaparral sigue en general tendencias muy parecidas a perennes aunque los valores absolutos son menores correspondiendo a vegetación de tipo arbustivo.

Sin embargo, comparaciones entre valores absolutos de NDVI entre distintos tipos de vegetación deben hacerse con cautela ya que los mismos niveles de NDVI no siempre corresponden a la misma cantidad de cobertura foliar, debido a diferencias en estructura de la cubierta y propiedades ópticas.

Análisis de la variabilidad espacial

Semivariograma a gran escala

En la zona de Santa Cruz, de los cuatro tipos de vegetación estudiados, las praderas, bosque perenne y el chaparral presentan una tendencia espacial clara. En bosques caducifolios, el bajo número de observaciones impidió una adecuada estimación de la semivarianza.

Las Figuras 3a, 3b, y 3c muestran los semivariogramas calculados para bosque perenne, chaparral y praderas en distintas épocas del año 95/96. En el gráfico asociado aparece el perfil temporal de NDVI y la precipitación para los años 95 y 96 junto con una señalización de los momentos del año para los que se ha calculado el semivariograma.

En líneas generales se observa la siguiente dinámica en la variabilidad espacial del NDVI: bosques perennes y chaparral, siguen una tendencia opuesta a su ciclo fenológico: de otoño a primavera, va disminuyendo la variabilidad espacial progresivamente, coincidiendo el mínimo de heterogeneidad espacial cuando el NDVI es máximo, a partir de ahí, empieza a aumentar la heterogeneidad espacial en contraposición a la disminución del NDVI hasta el verano, donde se estabiliza hasta empezar a disminuir de nuevo en otoño.

Sin embargo, en praderas, este ciclo de variabilidad espacial está más en fase con el NDVI. Así, en otoño presenta valores bajos y va aumentando a lo largo del invierno, llegándose al máximo de heterogeneidad coincidiendo con el punto de máximo NDVI a partir de donde ya se estabilizan los valores.

Esto se explica porque de la misma manera que la vegetación herbácea en un contexto temporal respondía más rápido y con mayor intensidad a cambios en precipitación (figura 2), en un contexto espacial responde a cambios pequeños en la distribución del recurso más limitante, en este caso el agua, y en períodos cortos, lo que se refleja en la evolución de la heterogeneidad en la productividad primaria. Sin embargo, son necesarias diferencias mayores en contenido de humedad del suelo, que ocurren más avanzada la estación, para que se reflejen en la vegetación leñosa, cuando esto ocurre las hierbas ya están agostadas manteniéndose su variabilidad espacial prácticamente constante hasta el otoño.

En cuanto a las características propias de los semivariogramas: en bosque perenne y chaparral los patrones son parecidos, sin embargo la semivarianza se estabiliza en Abril a un alcance de unos 40 km para el bosque perenne y unos 20 km en chaparral. La diferencia de valor del alcance podría estar

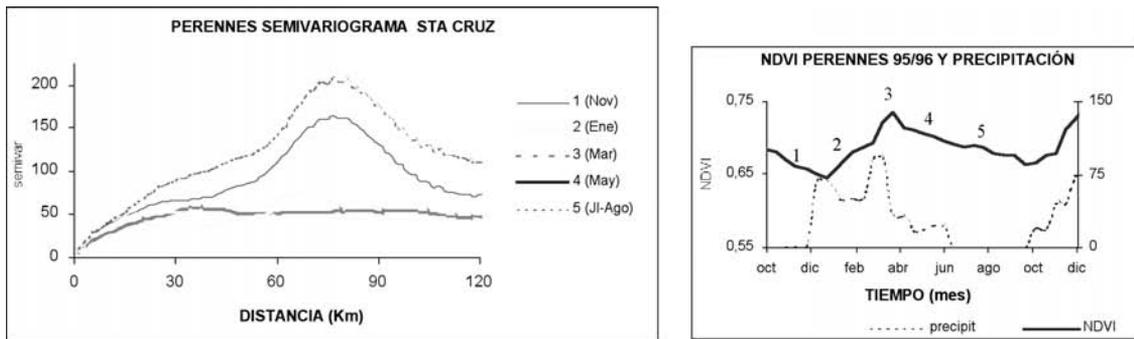


Figura 3 a

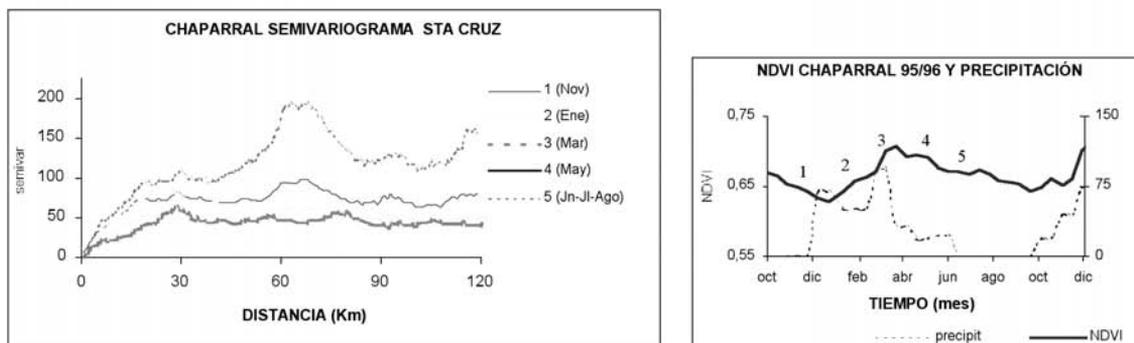


Figura 3 b

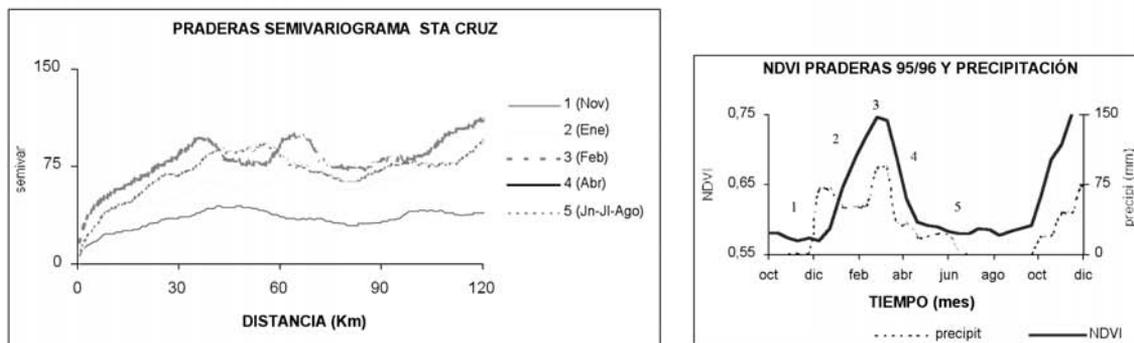


Figura 3 c

Figura 3a, 3b, y 3c. Semivariogramas del NDVI de imágenes AVHRR calculados para perennes, chaparral y praderas en varias fechas del año 95/ 96. El gráfico asociado a cada tipo de vegetación representa el NDVI y precipitación para ese año. Los números indican en que punto de la serie de tiempo están calculados los semivariogramas.

relacionada con el tamaño de los parcelas que son mas grandes en bosque perenne que en chaparral, así la dependencia espacial llega a unas distancias mayores. El valor del umbral (sill) es mayor para los meses secos que para los húmedos, ya que el factor limitante en verano que es la disponibilidad de agua. El valor del alcance es también algo mayor en verano, lo que quiere decir que el hecho de existir un factor limitante acentúa la influencia de los

demás factores medioambientales, como propiedades edáficas u orientación.

En los semivariogramas calculados en verano la varianza presenta un incremento significativo a un lag de unos 80 Km en perennes y 65 km en chaparral. Esto se debe probablemente a las diferencias de humedad existentes entre la cadena costera y las estribaciones Sierra Nevada para esta zona de California (Figura 1) que está en torno a 80 km. Aunque

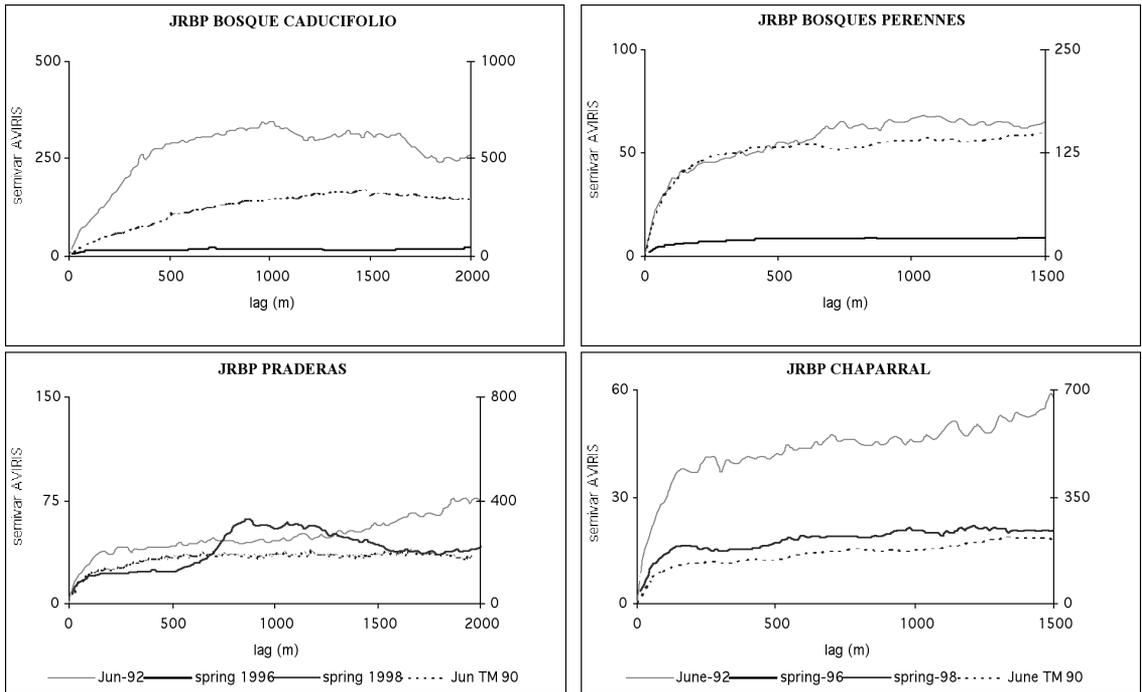


Figura 4. Semivariogramas calculados con imágenes de AVIRIS y TM en JRBP en distintos años y fechas de variables de estructura vegetal.

las dos zonas presentan una precipitación muy baja en verano, en la zona costera se dan frecuentes brumas y temperaturas más bajas que en las estribaciones de la Sierra Nevada. Esto causa que los puntos de la parte de Sierra Nevada presenten unas condiciones ambientales muy distintas de aquellos puntos situados en la zona costera. La disminución de la semivarianza a distancias mayores se debe probablemente a disminución de los puntos de muestreo que es función del número de polígonos encontrados a cada distancia.

En el caso de praderas existe una dependencia espacial hasta una distancia de unos 60 km en verano y de unos 40 km en invierno, siendo el umbral también mayor en verano y estabilizándose porque ya están secas. Probablemente en las praderas existe una mayor biodiversidad que se traduce en mayor variabilidad en ciclos fenológicos lo que junto al mayor impacto de pequeñas variaciones en contenido de humedad, creando patrones menos uniformes a esta escala que en vegetación arbórea debido a la superposición de distintos efectos.

Semivariograma a pequeña escala

Se observa en la Figura 4, que los semivariogramas calculados con datos de AVIRIS en JRBP en

primavera difieren para cada tipo de vegetación y año, siendo la variabilidad total siempre mayor en el año seco.

Las tendencias en la dinámica de la vegetación son similares a las que ocurren a mayores escalas aunque sus efectos (patrones) sean distintos. Así, la vegetación herbácea presenta máxima variabilidad espacial en primavera en un año medio (1996) y baja en Junio, mientras que la vegetación leñosa presenta mínima variabilidad en esa misma fecha, aumentando a medida que avanza la estación.

A estas escalas, en primavera la vegetación herbácea presenta los mayores niveles de dependencia espacial, mientras que en otras comunidades ésta es muy baja, probablemente debido a una mayor disponibilidad de agua gracias a su localización en zonas más húmedas y sistemas radiculares más profundos (Miller et al., 1983). Dependiendo del año, esta dependencia cambia, en años húmedos aparece a distancias mayores.

En Junio la situación se invierte, siendo la dependencia espacial menor en herbáceas y muy marcada en vegetación arbórea especialmente en caducifolios, que son menos resistentes a la sequía que chaparral o comunidades perennes. Los patrones detectados con TM y AVIRIS en Junio son muy similares, aunque a veces difieren en los niveles de umbral. Lo que podría deberse a diferencias fenológicas y de

precipitación, mas que de sensor, ya que en herbáceas y perennes los patrones son casi idénticos.

CONCLUSIONES

La variabilidad espacial observada en la estructura de la vegetación es función de la variabilidad climática estacional y anual, que modifica la fenología en diferente medida dependiendo del tipo de vegetación y su localización. Factores actuando a grandes escalas como gradientes ambientales, son mas importantes en bosques perennes, mientras que la vegetación herbácea está mas influida por factores actuando a niveles locales (menos de 1 Km.), como diferencias en contenido de humedad del suelo (especialmente en años secos) o propiedades locales del terreno (aspecto y drenajes).

Las series temporales de NDVI de AVHRR son apropiadas para el análisis de tendencias fenológicas de distintos tipos de vegetación a bajas resoluciones. Sin embargo, no detectan gran parte de la variabilidad interanual a escalas más finas, importante en comunidades herbáceas en primavera o perennes en Junio. Los fuertes gradientes existentes en la distribución de la vegetación en California, sugieren que el uso de este sensor no es apropiado para capturar mucha de la variabilidad presente en el paisaje. Una continuación de este estudio mediante comparaciones multitemporales más exhaustivas permitiría avanzar en el conocimiento de las interrelaciones clima —vegetación a distintas escalas espaciales y temporales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a George Scheer el apoyo informático, los comentarios del Dr. Jacquemod. y al programa NASA EOS grant No. NAS5-31359.

BIBLIOGRAFÍA

BURROUGH, P. A. y MCDONELL, R. A. 1998. *Principles of Geographic Information Systems*. Oxford University Press, pp 133-161.
DI, L., RUNDQUIST, D. C. y HAN, L. 1994. Modelling relationships between NDVI and precipitation during vegetative growth cycles. *In. J. Remote Sensing*. 15 (10): 2121-2136.
ELMORE, J. E., MUSTARD, J. F., MANNING, S. J. y LOBELL, D. B. 2000. Quantifying vegetation change in semiarid environments: precision and accuracy of spectral mixture analysis and the Normalized Differen-

ce Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment*. 73: 87-103.
FIELD, C. B., CHAPIN, F. S., MATSON, P. A. y MOONEY, H. A. 1992. Responses of Terrestrial Ecosystems to the Changing Atmosphere: A Resource-Based Approach. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 23: 201-235.
GAMON, J. A., FIELD, C. B., GOULDEN, M. L., GRIF-FEN, K. L., HARTLEY, A. E., JOEL, G., PEÑUELAS, J. y VALENTINI, R. 1995. Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three California vegetation types. *Ecol. Appl.* 5: 28-41.
GARCÍA, M. y USTIN, S.L. Detection of inter-annual vegetation responses to climatic variability using AVIRIS data in a coastal savanna in California. 2001. In press. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*.
GUYOT, G. y GU, X. F. 1994. Effect of radiometric corrections on NDVI determined from SPOT-HRV and LANDSAT-TM data. *Rem. Sens. of Environ.* 49:169-180.
HOBBS, R. J. 1990. Remote Sensing of Spatial and Temporal Dynamics of Vegetation. In: *Remote Sensing of Biosphere functioning*. Hobbs, R.J. and H.A. Mooney (eds). Springer-Verlag. Pp 203-220.
LAMBIN, E. F. 1996. Change detection at multiple temporal scales: seasonal and annual variations in landscape variables. *Photogram. Eng. Rem. Sens.* 62: 931-938.
LEVIN, S.A. 1993. Concepts of Scale at the Local Level. In *Scaling Physiological Processes Leaf to Globe*, edited by Ehleringer, J.R. and Field, C.B., (Academic Press Inc.), pp 7-18.
MILLER, P. C., POOLE, D. K. y MILLER, P. M. 1983. The influence of annual precipitation, topography, and vegetative cover on soil moisture and summer drought in Southern California. *Oecologia*. 56: 385-391.
MOONEY, H. A. PARSONS, D. J. y KUMMEROW, J. 1974. Plant development in Mediterranean climates. *Ecol. Stud. Anal. Synth.* 8: 255-267.
O'NEILL, R.V., RIITERS, K. H., WICKHAM, J. D. y JONES, K.D. 1999. Landscape pattern metrics and regional assesment. *Ecosystem Health*. 5: 225-236.
PARUELO, J. M. y LAUENROTH, W. K. 1995. Regional Patterns of Normalized Difference Vegetation Index in North American Shrublands and Grasslands. *Ecology*. 76 (6): 1888-1898.
SCHIMMEL, D. S. y BRADSWELL, B. H. 1997. Continental scale variability in ecosystem processes: models, data and the role of disturbance. *Ecol. Monogr.* 67: 251-271.
TURNER, M. G. y GARDNER, R. H. 1991. Quantitative Methods in Landscape Ecology: An introduction. *Ecological Studies*. pp 3-16.
TUCKER J. 1977. Use of near infrared/red radiance ratios for estimating vegetation biomass and physiological status. In *Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing of Environment*. 11 (1): 493-494. .
USTIN, S. L., ROBERTS, D. A. y HART, Q. J. 1997. Seasonal Vegetation Patterns in a California Coastal Savanna Derived from Advanced Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Data. In *Remote Sensing Change Detection: Environmental Monitoring Applications and Methods*, Elvidge, C.D., and Lunetta, R. (Eds.), Ann Arbor Press, MI.