



**CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS  
DEL NOROESTE, S.C.**

---

**Programa de Estudios de Posgrado**

**ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIAS  
NORMALIZADAS (NDVI) PARA LA PENINSULA DE BAJA CALIFORNIA,  
MEXICO (1981-2000)  
Y SU RELACION CON EL ENSO**

**T E S I S**

**Que para obtener el grado de**

**Maestro en Ciencias**

**Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales  
(Orientación Ecología de Zonas Áridas)**

**P r e s e n t a**

**María del Carmen Mercado Guido**

**La Paz, B.C.S. Junio del 2001**

## ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., siendo las 11:00 horas del día 18 del mes de Junio del 2001, se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por la Dirección de Estudios de Posgrado del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., para revisar la Tesis de Grado titulada:

### **ANALISIS DEL INDICE DE VEGETACION DE DIFERENCIAS NORMALIZADAS (NDVI) PARA LA PENINSULA DE BAJA CALIFORNIA, MEXICO (1981-2000) Y SU RELACION CON EL ENSO**

Presentada por el alumno:

**María del Carmen Mercado Guido**

Aspirante al grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACION DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACION EN **ECOLOGIA DE ZONAS ARIDAS**

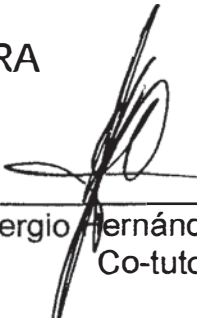
Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron su **APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

#### LA COMISION REVISORA



---

M. en C. César A. Salinas Zavala  
DIRECTOR DE TESIS



---

Dr. Sergio Hernández Vázquez  
Co-tutor



---

M. en C. Sara Cecilia Díaz C.  
Co-tutor



---

DR. SERGIO HERNÁNDEZ VÁZQUEZ  
DIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO

## RESUMEN

En el presente trabajo se analiza el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI) derivado del sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) de la serie NOAA-SeaWiFS, para la península de Baja California, México; como un indicador del vigor de la vegetación.

La mayor parte de la península se ubica dentro de uno de los cuatro desiertos más extensos de Norteamérica; el desierto sonorense, que se caracteriza por la diversidad de formas de vida que soporta y por las elevadas temperaturas incidentes. La porción septentrional presenta condiciones templadas y una pequeña porción al noroeste corresponde a la vegetación de clima mediterráneo.

Se propone una regionalización de la vegetación de la península, con base en los promedios mensuales de cada fotele durante el periodo de estudio (julio de 1981 hasta abril del 2000). La resolución de los foteles es de 8x8 km. Para definir los grupos se utilizó la técnica multivariada de k-medias, considerando la coherencia geográfica en la mesoescala y regionalizaciones propuestas previamente. Se identificaron seis grupos o regiones, para cada una de las cuales se muestra su patrón estacional y se discute la relación con las comunidades vegetales dominantes. Mediante un análisis de correlación cruzada entre las series de variación interanual del NDVI y el Índice de Oscilación del Sur (IOS), se determinó que en general, el vigor de la vegetación para la península manifiesta relación con el ENSO, mostrando la mayor correlación estadísticamente significativa hasta cinco meses después de que se ha iniciado el fenómeno en su centro de origen.

Palabras clave: Baja California, NDVI, ENSO

## **ABSTRACT**

The peninsula of Baja California is located within one of the major deserts of North America, the Sonoran Desert. Their life-forms diversity and the high incident temperatures characterize this. A small region in the southern of the peninsula has temperate affinity, and other one at the northeast limit corresponds to Mediterranean climate.

The present study proposes a regionalization of this region, generated by the Normalized Differences Vegetation Index (NDVI) monthly data to come from the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). Data from twenty years (June, 1981 to march, 2000) were considered to define the groups, applying the k-means multivariate method. For each one of the six resulted groups the seasonality was analyzed, and its relations with the dominant vegetation communities are discussed. Besides, these series were correlated with the Southern Oscillation Index (SOI) as an indicator of the atmospheric phenomena ENSO (EL Niño- Southern Oscillation), that is associated with abundant precipitation in the study region. The results show the major statistically significant correlation five months after the beginning of the ENSO in it origin center.

Key words: Baja California, NDVI, ENSO

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia, Toño, Sofía y Carolina, que me motivan para mejorar, y por que son mi mejor escuela en esta carrera de la vida.....

A mi madre, por su apoyo incondicional.....

y a DIOS, por prestarme vida para hacer ésto posible.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero manifestar mi agradecimiento a mi Comité Tutorial, especialmente al M. en C. César A. Salinas Zavala, quién propuso la idea central del tema y confió en mí para desarrollarlo; a la M. en C. Sara C. Díaz Castro, por su apoyo, orientación y amistad, y al Dr. Sergio Hernández Vázquez por su apoyo y orientación en los procesos estadísticos.

A mis amigas Alejandra Nieto, Alejandra Naranjo, Raquel y Cristina, por su apoyo y ánimos que siempre me dieron, por que sé que están conmigo siempre.

A todas las personas del CIBNOR que me brindaron su apoyo para la realización del presente trabajo, particularmente los técnicos del Herbario, por proporcionarme la bibliografía referente a vegetación y sus valiosos comentarios.

Durante el desarrollo de esta tesis, recibí apoyo por parte del Programa de Posgrado del CIBNOR, S.C. durante el primer año de estudio, y beca del CONACyT durante el segundo año, por lo que manifiesto mi agradecimiento a estas dos Instituciones.

## CONTENIDO

Resumen .....	i
Abstract .....	ii
Dedicatoria .....	iii
Agradecimientos .....	iv
Lista de figuras .....	vi
Lista de tablas .....	vii
Introducción .....	1
Los índices de vegetación.....	1
El Niño y el Índice de Oscilación del Sur.....	6
Objetivos y Justificación .....	9
Materiales y métodos .....	11
Area de estudio .....	11
Datos del NDVI .....	13
Resultados .....	16
Patrones estacionales .....	16
Variabilidad interanual del NDVI y su relación con el IOS .....	20
Discusión .....	32
Literatura citada .....	41

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Patrón estacional promedio del NDVI en los seis grupos resultantes del análisis de k-medias, para el periodo comprendido de julio de 1981 a marzo del 2000, en la península de Baja California, México.

Figura 2. Regionalización de la península de Baja California de acuerdo con los datos del NDVI, para el periodo de julio de 1981 a marzo del 2000.

Figura 3. Variabilidad mensual promedio del NDVI en la península de Baja California, México; para el periodo de julio de 1981 a marzo del 2000.

Figura 4. Variación interanual del NDVI en el grupo 1, asociado con la vegetación halófito, y análisis de correlación cruzada entre este grupo y el IOS. La línea punteada indica el nivel de significancia de 0.05.

Figura 5. Variación interanual del NDVI en el grupo 2, asociado con matorral sarcocaulo, y análisis de correlación cruzada entre este grupo y el IOS. La línea roja punteada indica el nivel de significancia de 0.05.

Figura 6. Variación interanual del NDVI en el grupo 3, asociado con cardonales y manglares, y análisis de correlación cruzada entre este grupo y el IOS. La línea roja punteada indica el nivel de significancia de 0.05.

Figura 7. Variación interanual del NDVI en el grupo 4, asociado con la selva baja caducifolia, y análisis de correlación cruzada entre este grupo y el IOS. La línea roja punteada indica el nivel de significancia de 0.05.

Figura 8. Variación interanual del NDVI en el grupo 5, asociado con el bosque de encino y de encino-pino, y análisis de correlación cruzada entre este grupo y el IOS. La línea roja punteada indica el nivel de significancia de 0.05.

Figura 9. Variación interanual del NDVI en el grupo 6, asociado con la vegetación de tipo chaparral y bosque de coníferas de afinidad mediterránea, y análisis de correlación cruzada entre este grupo y el IOS. La línea roja punteada indica el nivel de significancia de 0.05.

Figura 10. Mapa de isoyetas medias anuales (mm) para la península de Baja California. (tomado de García y Mosiño, 1968).

Figura 11. Regionalización fitogeográfica de la península de Baja California (tomado de Shreve y Wiggins, 1964).



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Diferentes Índices de vegetación propuestos (Terril, 1994)

Tabla 2. Valores máximos y mínimos del NDVI para los foteles correspondientes a las seis regiones de la península de Baja California.

## INTRODUCCION

### Los índices de vegetación

Los sensores remotos son el medio actual para observar los sistemas globales de manera sinóptica, regular y consistente. Los datos de los satélites se usan para documentar la distribución y extensión de amplios tipos de vegetación que se dan a escala global, así como los procesos interactivos físicos, químicos y biológicos que dominan la totalidad del sistema terrestre (<http://perigee.ncdc.noaa.gov/docs/gviug/cover.htm#top>).

Los instrumentos de percepción remota miden la radiación electromagnética reflejada y emitida por la superficie terrestre, registrando las porciones del espectro donde la atmósfera no absorbe la radiación fuertemente. En las regiones áridas del mundo también son evidentes los disturbios ocasionados tanto por cambios climáticos, como por la degradación debida a causas antropogénicas. El impacto más aparente se da sobre la cobertura vegetal, sin embargo, existen pocos estudios al respecto. Recientemente, se han desarrollado metodologías que utilizan la tecnología de percepción remota, para monitorear los cambios de la vegetación en respuesta a fluctuaciones ambientales. Una de ellas es el uso del Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI por sus siglas en inglés). Este índice se basa en las propiedades de reflexión diferencial de la vegetación verde en las

porciones visibles e infrarrojas del espectro y constituye un sistema de monitoreo.

La capacidad de reflexión diferencial de todos los organismos fotosintéticos se debe a la presencia de uno o más pigmentos capaces de absorber la radiación visible para iniciar sus procesos fotosintéticos. La porción visible del espectro electromagnético (430 - 600 nm) muestra la cantidad de energía absorbida por las plantas mientras que la región cercana al infrarrojo (750-1100 nm) actúa inversamente; es decir, presenta una alta reflectancia en la vegetación. La reflectancia diferencial de la vegetación en estas bandas, corresponden a los canales 1 (Ch1) y 2 (Ch2) (banda visible y cercana al infrarrojo respectivamente) de las imágenes del radiómetro AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). Este sensor se encuentra instalado en los satélites meteorológicos operacionales NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) de la serie 14 y previos (11, 9 y 7), y actualmente en el satélite SaWiFS. Se ha encontrado que varias combinaciones matemáticas de los canales 1 y 2 son indicadores sensibles de la presencia de vegetación verde y son referidos como índices de vegetación, que muestran una medida del grado del vigor o salud de la vegetación que observa el satélite por unidad de tiempo y espacio.

Un índice de vegetación se define como un número generado por la combinación de bandas de sensores remotos y puede tener algunas relaciones con la cantidad de vegetación en una imagen de un fotel determinado. A la

fecha se han propuesto varios índices (Tabla 1) los cuales utilizan diferentes combinaciones de bandas espectrales, con el objeto de identificar la que represente de una manera más contundente las condiciones de la vegetación para una región determinada (Terri, 1994).

Tabla 1. Diferentes Índices de vegetación propuestos (Terri, 1994)

Índice	Autor	Rango	Cálculo	Características
RVI	Jordan, 1969	0 a $\alpha$	NIR/red	Usa varios radios para eliminar efectos de albedo.
NDVI	Kriegler et al. 1969, Rouse et al. 1963	-1 a +1	NIR-red/ NIR+red	Equivalente al RVI. Las líneas de vegetación convergen en el origen.
DVI	Richardson y Everitt, 1992	$\alpha$	NIR-red	Índice perpendicular, las líneas de vegetación son paralelas a la línea de suelo.
WDVI	Clevers, 1988	$\alpha$	NIR-g*red	Índice perpendicular, es muy sensible a variaciones atmosféricas.
SAVI	Huete, 1988	-1 a +1	(NIR-red/ NIR+red+L) (1+L)	Intenta reducir el "ruido" por diferencias en el suelo, pero es menos sensible a cambios en la vegetación y más sensible a variaciones atmosféricas.
TSAVI	Baret, et al., 1989 y Baret y Guyot, 1991	-1 a +1	S(NIR-s*red-a)/ (a*NIR+red-a*s+X*(1+s*s))	Asume que la línea de suelo tiene pendiente e intercepto arbitrarios. Trata de minimizar el efecto del background del suelo.
GEMI	Pinty y Verstraete, 1991	0 a +1	Eta*(1-0.25*eta) - (red-0.125/1-red)	Intenta crear un stock de correcciones atmosféricas para los índices de vegetación, sensibilidad dudosa al ruido del suelo.
GVI	Kauth y Thomas, 1976; Crist y Cicone, 1984; Jackson, 1983	-1 a +1	-0.29*MSS4-0.56*MSS5+0.60*MSS6+0.49*MSS7	Define la línea de suelo a partir de varios puntos. Usa varias bandas.

g\* es la pendiente de la línea de suelo  
a es la línea de intercepto del suelo  
s es la pendiente de la línea de suelo  
x es el factor de ajuste que minimiza el ruido del suelo  
NIR Indica una banda que cubre todo o parte de la porción cercana al infrarrojo del espectro  
TM es un "trazador temático Landsat que tiene seis bandas que cubren dif. longitudes de onda  
MSS se refiere a un explorador multiespectral Landsat (MultiSpectral Scanner)  
Eta\* es la ecuación  $2*(NIR^2-red^2)+1.5*NIR+0.5*red/ NIR+red+0.5$

Con la finalidad de reducir los errores debidos a factores atmosféricos, es considerable la variedad de índices que se han propuesto a partir de los datos que generaron los primeros sensores remotos. Los valores utilizados en estos análisis se encuentran ya normalizados por ello el intervalo de variación es de -1 a 1. Con respecto a las correcciones que se han implementado en las mediciones de los sensores AVHRR, se han considerado efectos atmosféricos tales como dispersión por polvos, aerosoles y nubosidad, los cuales actúan incrementando Ch1 con respecto a Ch2, reduciendo así los valores de los índices de vegetación calculados. Posteriormente se incluyeron valores de datos de otros canales que pueden usarse en la dispersión de nubes y ángulos de inclinación del sol en el cenit.

Existen numerosos trabajos que han aplicado estas técnicas actuales para analizar la vegetación en distintas regiones, abarcando desde bosques, hasta ambientes áridos. Entre ellos se puede citar el trabajo desarrollado por Hlavka y Strong (1992) quienes analizaron la deforestación y fragmentación de hábitats en los bosques de Uganda. La información que generaron a partir tanto de imágenes Landsat como de las bandas 1 y 2 del radiómetro AVHRR, es consistente con la reportada en otros trabajos; y sus resultados confirman que estas dos fuentes de imágenes contienen esencialmente la misma información.

Liping *et al.* (1994) desarrollaron un modelo que describe la efectividad en que la vegetación de las colinas arenosas de Nebraska, utiliza el agua de

lluvia; para ello analizaron datos de NDVI calculado de imágenes Landsat MSS. Ellos encontraron que la respuesta pico de la vegetación a un evento de lluvia cambia a lo largo de la temporada de crecimiento, siendo de 14 días al inicio, de 25 a mediados y de 12 días al término de la temporada. Por su parte, Hobbs (1997) presenta dos acercamientos empíricos para correcciones de humedad atmosférica de datos generados por la NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration) en Australia, donde la temporada de crecimiento puede ser tan corta, que deben utilizarse imágenes individuales para el monitoreo de la vegetación; y por ser una región de bajas latitudes, predominan las perturbaciones por nubosidad y humedad atmosférica, por lo que resulta necesario desarrollar técnicas para reducir estos efectos atmosféricos en los cálculos del NDVI. El primer acercamiento es usando datos de radiosonda, y el segundo utiliza la diferencia de temperatura entre las bandas 4 y 5 del radiómetro. Los resultados muestran que la segunda aproximación es un buen indicador de humedad atmosférica y reduce significativamente el efecto atmosférico sobre el NDVI, no obstante, perturbaciones diarias en las observaciones del NDVI requieren ser corregidas.

Schmidt y Karnieli (2000) monitorearon dos tipos de ambientes de dunas en el desierto de Negev Israel; comparando los datos del NDVI generados por la NOAA/AVHRR y un índice de vegetación que obtuvieron a partir de datos de reflectancia *in situ*, valorado con la cobertura fraccional de cada componente de vegetación. En sus resultados encontraron una buena relación entre la

magnitud del NDVI/AVHRR y su modelo lineal en el ambiente rocoso; mientras que en el ambiente arenoso se encontró una baja correlación, ya que el pico del NDVI calculado ocurrió al mismo tiempo que las anuales, pero un mes después que el otro índice. Esta diferencia se explica por la sobreposición de estratos que presenta la vegetación en el ambiente arenoso; y por que la contribución de cada componente de la vegetación (perennes, anuales y líquenes) al NDVI cambia a lo largo de la temporada de lluvias.

Nicholson y Farrar (1994) analizaron la influencia del tipo de suelo en la relación entre el NDVI, la lluvia y la humedad del suelo en Botswana, durante el periodo de 1982 a 1987. Ellos encontraron que en general el NDVI presenta una respuesta lineal con la lluvia, sin embargo, alcanza un límite de saturación aproximadamente a los 500 mm/año, por arriba del cual, la respuesta del NDVI a la lluvia incrementa muy ligeramente. Mientras que Farrar *et al.* (1994) analizan la relación NDVI-lluvia-humedad del suelo; en sus resultados demuestran que los distintos tipos de suelo varían en su capacidad de retención de agua, lo cual esta relacionado con sus características texturales, básicamente su contenido de arcilla; sin embargo, la relación con el NDVI es más compleja ya que intervienen otros factores.

### **EL Niño y el índice de oscilación del sur (IOS)**

Las comunidades vegetales, al igual que cualquier asociación de organismos vivos, presentan cambios en su estructura y composición, a través

del tiempo y del espacio. Estos cambios pueden ser ocasionados por varios factores, por ejemplo enfermedades, incendios, fluctuaciones climáticas, etc. Estas últimas se pueden manifestar de manera cíclica, ya sea estacional, anual o decadal. Entre los eventos climáticos extremos que llegan a modificar los patrones de vegetación en una escala interanual, destacan el ENSO (siglas con que se conoce el fenómeno oceanico-atmosférico El Niño-Oscilación del Sur), los eventos ciclónicos de origen tropical, que se conocen como circulación monzónica de verano y la influencia de la circulación de latitudes medias que determina el clima mediterráneo en la porción más norteña de la península. No obstante que en la península de Baja California predominan condiciones de aridez, en algunos años abundantes precipitaciones llegan a presentarse, las cuales llegan a modificar la cobertura vegetal en una escala interanual. La presencia de estas precipitaciones en invierno, se han asociado con la ocurrencia de El Niño; mientras que La Niña se asocia con periodos de extrema sequía (Díaz y Salinas Zavala, 2000). Por ello se consideró pertinente analizar la relación de las condiciones de vegetación de la península con este fenómeno climático.

El evento conocido como El Niño (EN), inicialmente estaba referido al calentamiento de la capa superficial del mar en las costas de Perú, pero más tarde, este término se aplicó a un calentamiento de mayor escala en las aguas del Océano Pacífico Central, que se identificó tenía vinculación con otras anomalías ambientales que ocurrían a gran distancia, básicamente, cambios



en la presión atmosférica. El reconocimiento del acoplamiento de las oscilaciones de la presión atmosférica y la temperatura superficial del mar, da origen al concepto más amplio de ENSO (por sus siglas en inglés El Niño-South Oscillation) (Glantz, 1991).

El ENSO es un evento que se presenta de manera recurrente, que llega a afectar el clima global, y se ve reflejado en climas regionales. La ocurrencia de este fenómeno se asocia con sequías en Indonesia, India, Filipinas, Australia, Noreste de Brasil, Etiopía, Sur de Africa y otras regiones; inundaciones en el Sur de Brasil, Perú y Ecuador; colapso de la pesca de anchoveta y salmón en las costas de E.U, por lo que se han desarrollado Programas internacionales de investigación para monitorearlo.

El índice de oscilación del sur (IOS) es un indicador de las condiciones atmosféricas asociadas con el ENSO; se calcula por la diferencia de presiones atmosféricas entre la isla de Tahití y el puerto de Darwin. Bajo condiciones normales, cerca de Darwin, Australia se presenta una presión atmosférica baja, mientras que el centro de alta presión se localiza cerca de Tahití; por lo que valores muy negativos del IOS indican un evento El Niño (condiciones más cálidas que las condiciones promedio) y altos valores positivos indican un evento La Niña (condiciones ambientales más frías que las condiciones promedio). En los años de La Niña (LN), los vientos que soplan del este desde el continente Americano son más fuertes que de costumbre y empujan hacia el oeste un volumen mayor de agua cálida de la superficie del mar, lo que causa

que mayores volúmenes de agua profunda afloren a la superficie y produzcan una lengua fría que se extiende casi 5,000 km a lo largo del ecuador, que pueden llegar a provocar lluvias de monzón intensas en India, precipitaciones torrenciales en Australia y sur de Africa.

Las regiones áridas del mundo no escapan a los disturbios ocasionados tanto por cambios climáticos, como por la degradación debida a causas antropogénicas, y a pesar de que tienen gran impacto sobre la cobertura vegetal, existen pocos estudios al respecto (Nicholson y Farrar, 1994; Anyamba y Eastman, 1996; Schmidt y Karnieli, 2000).

### **Objetivos y justificación**

En el presente trabajo se analiza la variabilidad espacio-temporal del NDVI para la península de Baja California, durante el periodo de julio de 1981 a abril del 2000. Con ello se intenta probar la aplicación de la información generada por sensores remotos en una región donde prevalecen las condiciones áridas, y la vegetación natural presenta adaptaciones de respuesta rápida a las condiciones climáticas de mayor humedad. El conocimiento de esta variabilidad en las condiciones de la vegetación natural y su asociación con eventos climáticos que se presentan de manera recurrente, podría ser un indicador importante para el uso y manejo de la vegetación con fines alimenticios o forrajeros. Se espera que se manifiesten en el NDVI los últimos eventos más fuertes del ENSO que ocurrieron en los últimos 20 años

(<http://www.cdc.noaa.gov/~kew/MEI/>). Para ello se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- 1. Obtener una regionalización promedio de la península de Baja California con base en las variaciones mensuales del Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI).
- 2. Determinar las fluctuaciones interanuales en los patrones de vegetación obtenidos a partir del NDVI.
- 3. Analizar la relación de las variaciones interanuales del NDVI con el fenómeno climático ENSO.

La información obtenida permitirá conocer los cambios espaciales y temporales que ocurren en el vigor de la vegetación, así como la manera en que ésta responde a las fluctuaciones ambientales que determinan el clima a una escala regional. Por consiguiente, la regionalización de la península de Baja California resultante a partir de los valores promedio del NDVI, se espera que coincida de manera general con regionalizaciones propuestas previamente que se basan en estudios de campo, pero que a su vez presentan limitaciones en la escala temporal.

## **MATERIALES Y METODOS**

### **Area de estudio**

La península de Baja California forma parte de la porción noroeste del país. Se extiende en sentido noroeste-sureste, a lo largo de más de 1600 km, en casi 10 grados de latitud; y tiene una anchura promedio de 100 km. A lo largo de la Península se encuentra un complejo montañoso de origen volcánico, que está interrumpido por pequeñas montañas, lomeríos y algunos valles. Este macizo montañoso constituye el parteaguas entre las vertientes del Golfo de California y del Océano Pacífico, y debido a que se encuentra cargado hacia la costa este, las pendientes más abruptas son las que descienden hacia el Mar de Cortés, y son mucho más suaves en la vertiente opuesta. Esta cadena montañoso presenta su mayor desarrollo en el cuarto septentrional de la península, donde forma las sierras de Juárez y de San Pedro Mártir, con altitudes hasta de 2400 msnm; mientras que en el extremo sur de la península destaca la Sierra de la Laguna que alcanza los 2090 msnm (Rzedowski, 1981).

Desde el punto de vista fitogeográfico, la mayor parte de la península se encuentra dentro de la región denominada Desierto Sonorense (Shreve y Wiggins, 1964) que es uno de los cuatro desiertos de Norteamérica. Esta región se caracteriza por el número y variedad de formas de vida, por la diversidad de sus comunidades vegetales y por las elevadas temperaturas

incidentes (Axelrod, 1979). La porción septentrional de la península corresponde a la Región del Cabo; caracterizada por una gran diversidad biótica a lo largo de su gradiente altitudinal, que culmina con las condiciones más méxicas de la región. Finalmente, una pequeña porción al noroeste de la Península corresponde a la vegetación de tipo mediterráneo que se caracteriza por presentar su patrón de lluvias en invierno.

La influencia del mar a lo largo de ambas costas, es determinante en las condiciones climáticas de la Península. La costa del Pacífico está regulada por la corriente de California, por lo que es relativamente fría y sujeta a niebla frecuente; mientras que la costa del Golfo de California es más extremosa (Hasting y Turner, 1965; Mosiño, 1966).

Las diferencias de 11 grados de latitud entre los límites norte y sur acentúan las diferencias entre las temperaturas de invierno a lo largo de la península. Con respecto a las temperaturas de verano, éstas se acentúan por la posición continental del extremo norte. El incremento gradual en elevación de las costas hacia el interior resulta en una ligera caída en el rango de temperatura, lo que también causa un incremento en la precipitación. Una importante característica de las lluvias en el desierto sonorense es el cambio en su distribución estacional desde su porción continental hacia la costa del Océano Pacífico.

El tipo de formación y la historia del desarrollo de suelos en una región desértica presentan muchas características que son comunes a todos los

suelos; pero a la vez exhiben un número de fenómenos y de condiciones distintivas que se atribuyen a la deficiencia de lluvia, mas aún, a su carácter intermitente y torrencial.

### **Datos del NDVI**

Los datos sobre el índice de vegetación derivados de satélite se obtuvieron de la base de datos publicada por la NOAA en la página Internet <http://eosdata.gsfc.nasa.gov>,<sup>3</sup> y se realizaron las adaptaciones que ahí se mencionan. Estos datos se encuentran en formato binario en resolución espacial de 8 X 8 km, sobre una base mensual. Se extrajeron los datos de la ventana geográfica 33°N - 117°W, 33°N – 108°W, 20°N – 117°W y 20°N – 108°W que abarca el área de estudio. De esta ventana se eliminaron los foteles correspondientes a la porción continental, dejando únicamente los de la península e islas adyacentes, quedando un total de 2586 foteles. La base de datos cuenta con información desde julio de 1981 hasta la actualidad; sin embargo, para el presente estudio se considero hasta marzo del 2000, que fue cuando se extrajeron los datos. Este periodo presenta cinco meses faltantes, noviembre de 1993 y el periodo de septiembre a diciembre de 1994, quedando un total de 215 meses de observaciones para cada fotel; lo que da por resultado un total de 555,990 datos del NDVI.

En el análisis de la información el primer paso fue encontrar el año tipo calculando para cada fotel, el promedio de cada mes del año para el período

de estudio. Se considera que este año tipo es representativo de las condiciones promedio que prevalecieron durante las últimas dos décadas en la región; también se conoce como promedio histórico. Posteriormente, esta información fue utilizada para definir las anomalías o desviaciones de cada uno de los valores mensuales de los foteles, con respecto a este valor promedio.

Con estos datos transformados, se aplicó la técnica multivariada de k-medias para agrupar los foteles en función de su variación interanual y obtener una regionalización del área de estudio. La técnica multivariada de k medias conglomerados, consiste en la organización de un número preestablecido de grupos (k), con los criterios de minimizar las diferencias entre los componentes de cada grupo y maximizarlas entre grupos (Statística, 1993). El criterio para decidir el valor de k estuvo en función del número mínimo de iteraciones necesarias para obtener los patrones estacionales. Se consideró también la coherencia geográfica en la mesoescala y en la regionalización previamente establecida en función de la estructura y composición florística en la península, regionalizaciones previas propuestas por, Shreve y Wiggins (1964) y Wiggins (1980). Una vez identificados los foteles en sus grupos respectivos, se obtuvo para cada grupo su patrón estacional, promediando los valores de cada uno de los meses del año, para representar la variación estacional promedio del grupo. Finalmente, se realizó un análisis de correlación cruzada (ACC) (Statística, 1993) entre la serie del NDVI en cada grupo y los valores del IOS (indicador de

EN), con la finalidad de identificar la relación y tiempo de retraso de este evento climatológico con las fluctuaciones del vigor o verdor de la vegetación.



## RESULTADOS

Para obtener la regionalización se asignaron al programa diferentes valores de  $k$ , desde 3 hasta 14; siendo 6 con el que se observó una mejor agrupación y coherencia con trabajos realizados previamente, tanto con variables físicas (fisiografía) cómo con aspectos biológicos (básicamente de vegetación (Shreve y Wiggins, 1964).

### Patrones estacionales

En la figura 1 se muestran los seis tipos de patrones estacionales resultantes del análisis de  $k$ -medias. Claramente se identifican 5 tipos con valores máximos del NDVI durante la segunda parte del año, asociados a las lluvias monzónicas de verano y un tipo con valores máximos en la primera mitad del año, asociados al clima mediterráneo. Cabe aclarar que aun cuando los grupos identificados no corresponden a unidades fisonómico-florísticas claramente definidas, sino que únicamente se agrupan por el tipo de patrón estacional promedio los valores del NDVI, a cada grupo se le asignó el nombre genérico de la unidad vegetal más representativa del área de estudio.

Cada uno de los patrones corresponde a un grupo de foteles o región que muestran condiciones semejantes en las tendencias del vigor de la vegetación. La regionalización resultante se muestra en la figura 2.

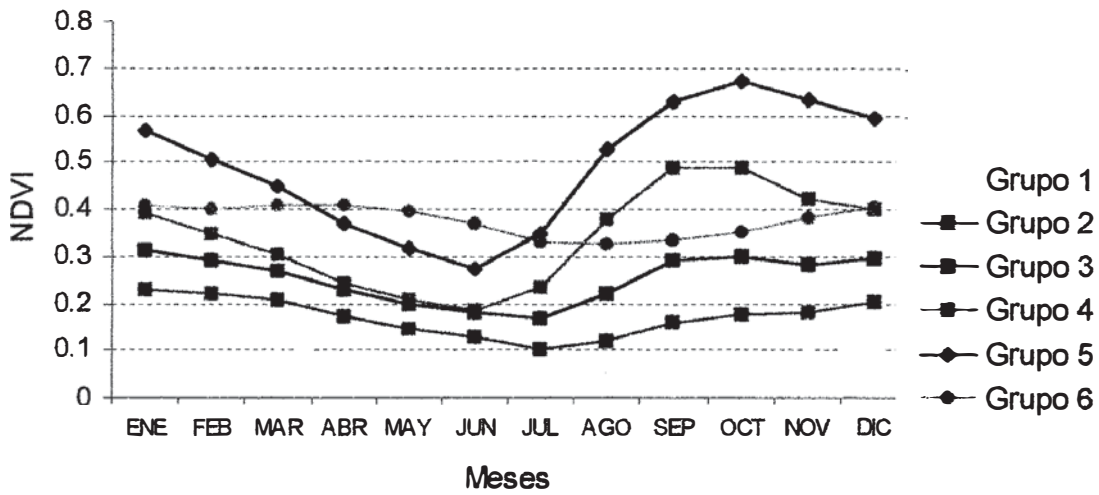


Figura 1. Patrón estacional promedio del NDVI en los seis grupos resultantes del análisis de k-medias, para el periodo comprendido de julio de 1981 a marzo del 2000, en la península de Baja California, México.

Grupo 1. Es el grupo que reúne mayor número de foteles; se encuentra a lo largo de la región costera y gran parte del desierto del Vizcaíno. Este patrón estacional no presenta grandes variaciones a lo largo del año, el máximo se encuentra en enero, y los valores más bajos del NDVI ocurren durante julio y agosto. La vegetación que se asocia a esta región es el **matorral xerófilo**.

Grupo 2. Este grupo de foteles se extiende a lo largo de gran parte de la península, y se asocia generalmente con el **matorral sarcocaulé**. La variación en su patrón estacional está ligeramente marcado, presenta su valor mínimo durante julio-agosto y los valores más altos en diciembre-enero. Su tendencia

es similar a la que se presenta a lo largo de la costa, aunque los valores del índice son ligeramente mayores.

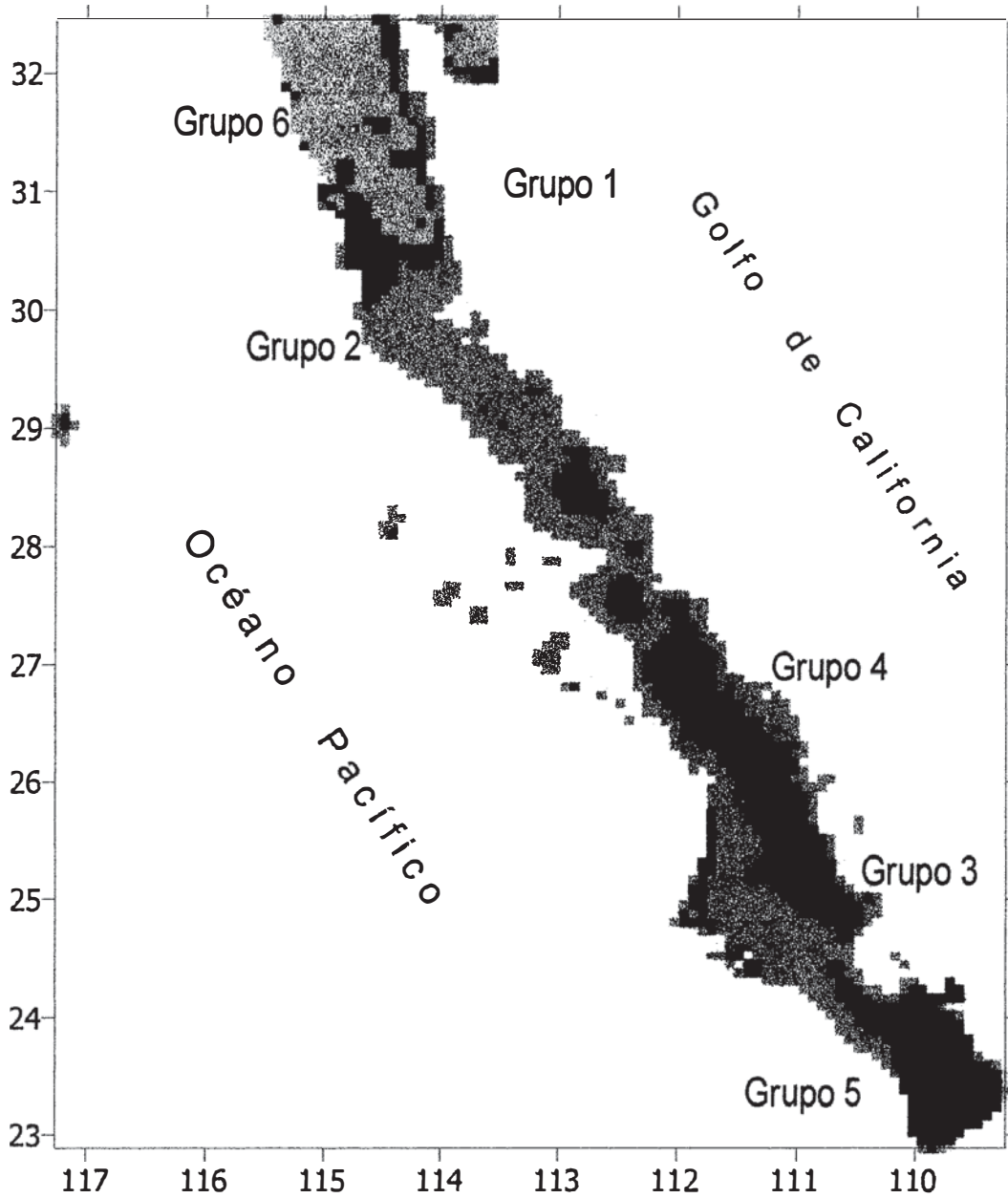


Figura 2. Regionalización de la península de Baja California de acuerdo con los datos del NDVI, para el periodo de julio de 1981 a marzo del 2000.

Grupo 3. Este grupo resulta difícil asociarlo con un solo tipo de vegetación, ya que combina porciones medias de la Sierra de la Giganta, parte de la región costera en Puerto San Carlos y bordea la porción de afinidad mediterránea que se ubica al norte de la península. Engloba varios tipos de vegetación, desde **cardonales, manglares y chaparral**.

Grupo 4. En este grupo se reúnen los foteles que corresponden a la porción elevada de la Sierra de la Giganta y las partes bajas de la Sierra de la Laguna. La tendencia en su patrón estacional es semejante al que se presenta en las porciones elevadas de la Región del Cabo, presentando los valores más bajos en junio, aumentando de manera abrupta hasta alcanzar los máximos valores durante septiembre y octubre, para después disminuir de manera más suave. En general, esta zona corresponde al tipo de vegetación denominada **selva baja caducifolia**.

Grupo 5. Es el grupo con menor número de foteles, y se limita a las porciones elevadas de la Región del Cabo, donde la vegetación dominante desde el punto de vista estructural es el **bosque de encino pino**. Presenta los valores más elevados del NDVI, así como una marcada variación estacional, con los valores más bajos durante junio, aumentando de manera abrupta en el siguiente bimestre, hasta octubre, que es cuando presenta los valores más altos y declina nuevamente con una pendiente suave.

Grupo 6. Este grupo de foteles muestra un patrón estacional asociado al clima mediterráneo; se caracteriza por presentar el máximo valor del NDVI durante la primera mitad del año, en los meses de marzo-abril y los mínimos durante julio-agosto, para incrementarse nuevamente en diciembre. La región que define este grupo se ubica en la porción noroeste de la península, y la vegetación dominante es de tipo **chaparral**, aunque también incluye al **bosque de coníferas con afinidad mediterránea**.

Es importante remarcar que la regionalización de la península descrita anteriormente se obtuvo a partir de las condiciones promedio a lo largo del año; sin embargo, existe una variabilidad geográfica mensual en las condiciones de vigor o verdor de la vegetación. En la figura 3 se muestra esta variación mensual.

### **Variabilidad interanual del NDVI y su relación con el IOS**

Como se mencionó anteriormente, a la serie de tiempo de cada grupo le fue removida la estacionalidad para observar las variaciones interanuales. Los resultados de la variabilidad interanual se presentan por cada región tratando de asociar los grupos a las unidades fisonómico-florísticas descritas en función de muestreos en campo por otros autores. Cabe aclarar que en estricto ésta es sólo una aproximación ya que la información requiere verificarse en campo.

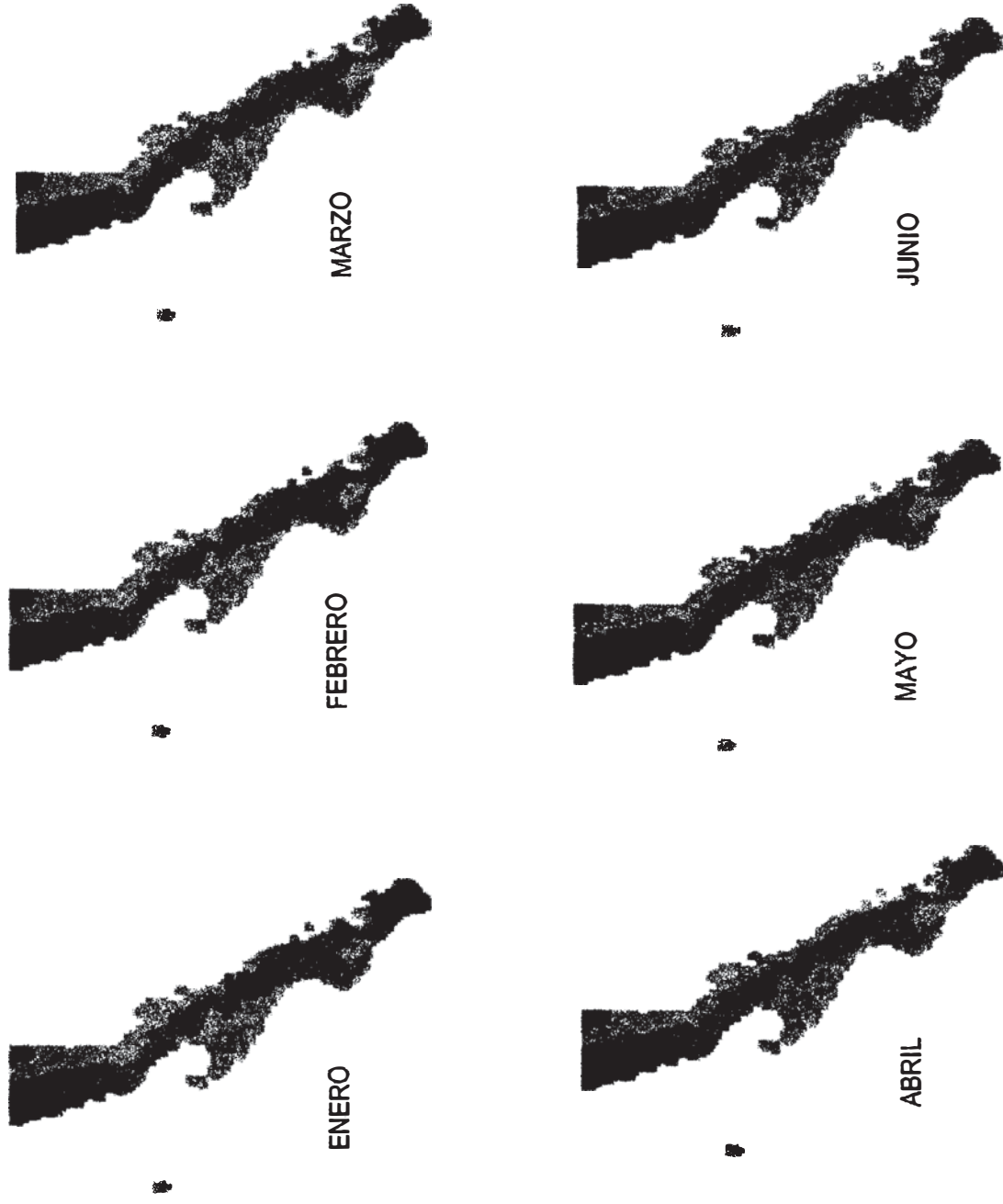
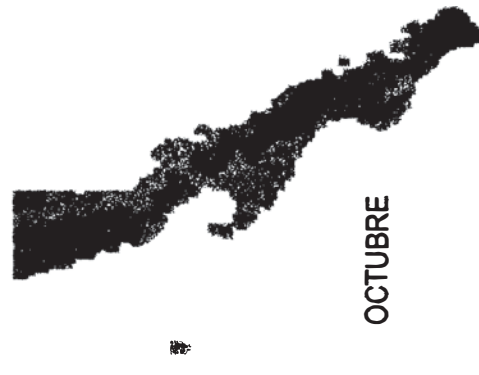
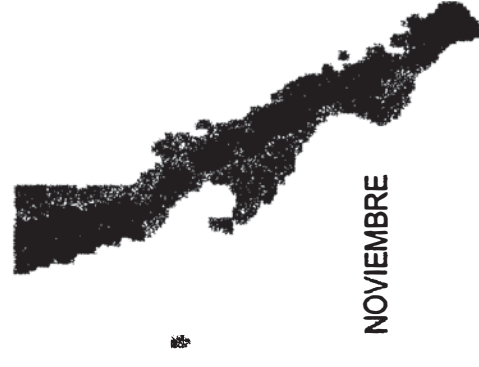
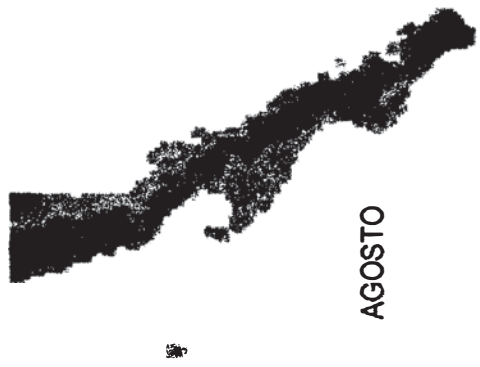
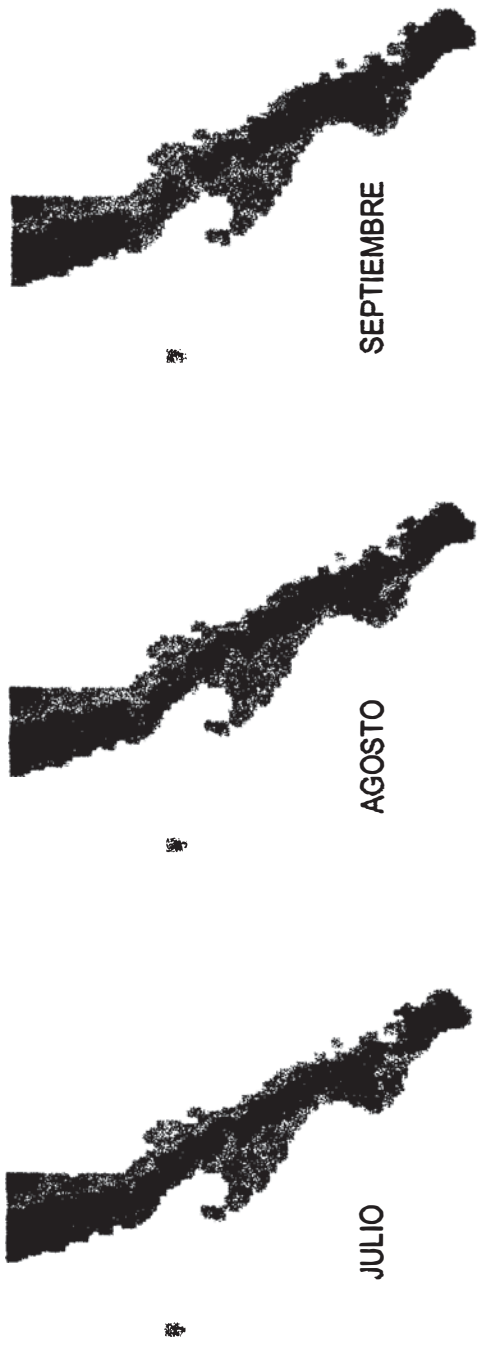


Figura 3. Variabilidad mensual promedio del NDVI en la península de Baja California, México; para el periodo de julio de 1981 a marzo del 2000.



Continuación figura 3...

Grupo 1. En la mayoría de las series existen dos períodos de valores elevados del NDVI, el primero se encuentra centrado a mediados de 1984, seguido de un período de bajos valores del indicador de vigor de la vegetación que se extiende hasta mediados del 1990. A partir de esta fecha se manifiesta el segundo máximo de la serie el cual culmina a principios de 1995. El último lustro se caracteriza por presentar valores bajos en esta región. El ACC muestra que ésta región tiene la mayor correlación con el ENSO estadísticamente significativa con un retraso de 5 meses, es decir, los valores más altos del índice de vegetación se presentan cinco meses después de los valores más negativos del Índice de Oscilación del Sur (IOS)

Grupo 2. La variabilidad interanual de los foteles que agrupan esta región muestra las mismas tendencias generales de la serie anterior, dos valores máximos el primero centrado a mediados del año de 1985 y el segundo a principios del año de 1993. Son evidentes también los períodos de bajos niveles del índice desde principios de 1986 hasta finales de los 90`s así como en el último lustro. En cuanto a la relación con el ENSO, el ACC muestra la más alta correlación estadísticamente significativa con cinco meses de retraso.

Grupo 3. Las variaciones interanuales en esta región muestran una tendencia similar a los grupos anteriores, dos periodos de valores altos que indican vigor en la vegetación, seguidos de periodos de valores bajos, el primero de



mediados de 1985 a 1990 y el segundo de 1996 a 1997. El valor máximo extremo que se presenta en el mes de enero de 1994 será discutido posteriormente. El efecto de valores negativos del IOS se manifiesta cinco meses después en valores altos del NDVI.

Grupo 4. Las variaciones interanuales de este grupo son más marcadas que en las series anteriores, sin embargo, se muestran nuevamente dos períodos de máximos valores del NDVI. El primero abarca de principios de 1983 a finales de 1985 (2.5 años); y el segundo que inicia a mediados de 1990. Con respecto a la relación que guarda esta serie con el indicador del evento ENSO, nuevamente la mayor correlación se encuentra con un retraso de cinco después de iniciado el evento.

Grupo 5. Las porciones elevadas la Sierra de la Laguna se asocian a este grupo de foteles que muestran valores más extremos que las series anteriores, ya que se observan valores que sobrepasan los 0.15 (julio de 1984, agosto de 1994 y julio de 1997); mientras que diciembre de 1988 y agosto de 1991 registran los valores más negativos. Presenta una alta variabilidad interanual de alta frecuencia, dando por resultado que sean menos aparentes los dos periodos de valores máximos que se identificaron en las series anteriores. El ACC muestra que ésta región tiene la mayor correlación estadísticamente significativa con el ENSO con un retraso de 5 meses.

Grupo 6. Esta serie corresponde al grupo de clima mediterráneo, presenta una clara variación de más baja frecuencia que las señales correspondientes a los grupos con afinidad de lluvias de verano. Asimismo, no es notable el primer periodo de valores bajos del índice de vegetación, manifestándose hasta enero de 1989 y termina a principios de 1993. La relación con el ENSO es significativa a partir del tercer mes de que se presenta el evento y se sostiene hasta alcanzar su máxima correlación en el onceavo mes.

En la tabla 2 se resumen las características principales de los foteles que comprenden cada uno de los grupos o regiones descritas en los párrafos anteriores.

Tabla 2. Valores máximos y mínimos del NDVI para los foteles correspondientes a las seis regiones de la península de Baja California.

<b>Grupo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>
1	0.1385	-0.0915
2	0.1957	-0.1615
3	0.1759	-0.1133
4	0.1795	-0.1179
5	0.1275	-0.0777
6	0.1943	-0.2148

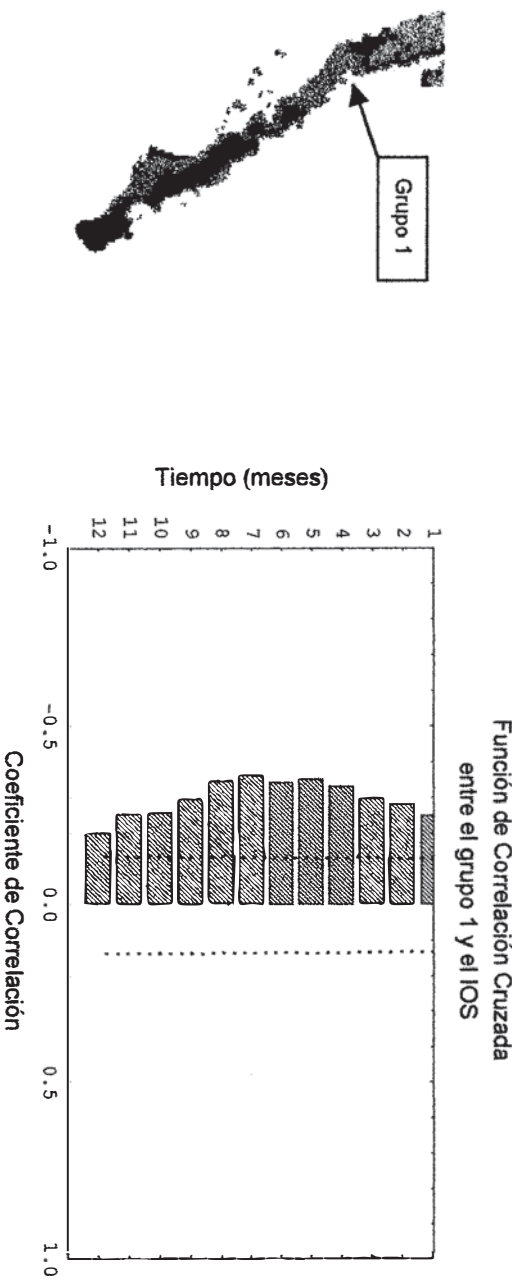
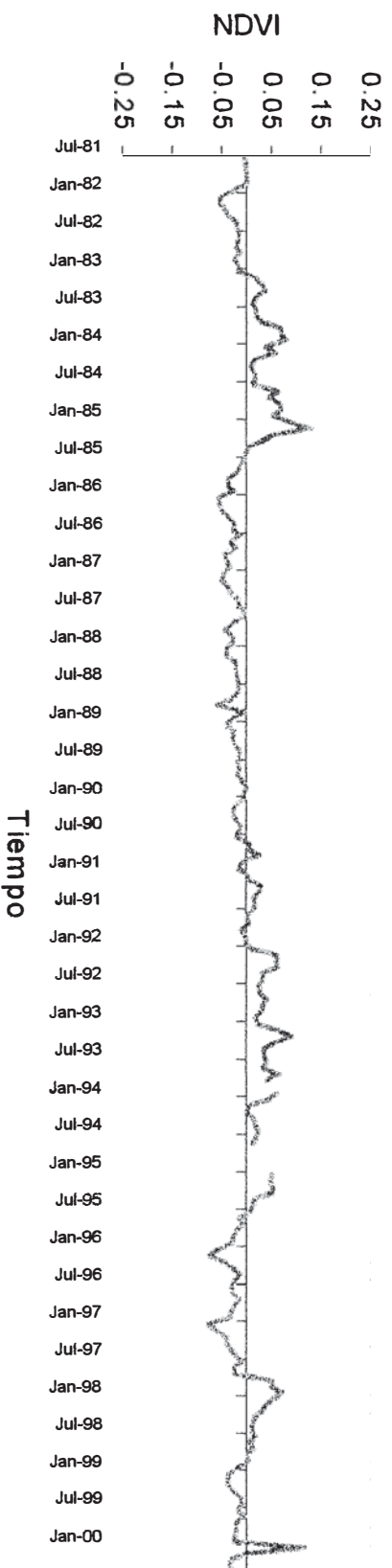


Figura 4. Variación interanual del NDVI en el grupo 1, asociado con la vegetación halófila, y análisis de correlación cruzada entre este grupo y el IOS. La línea punteada indica el nivel de significancia de 0.05.

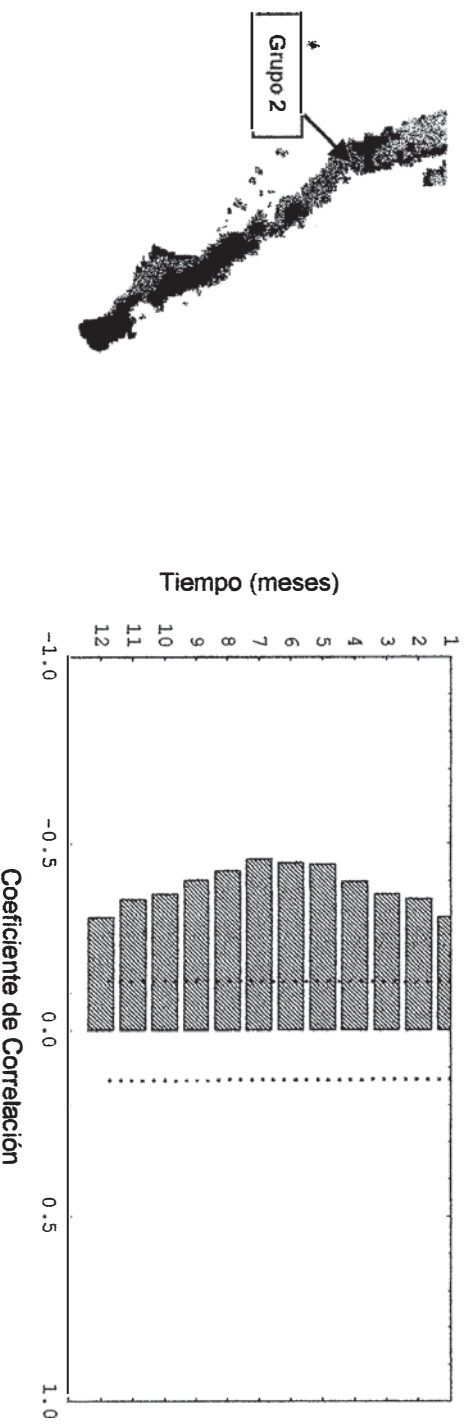
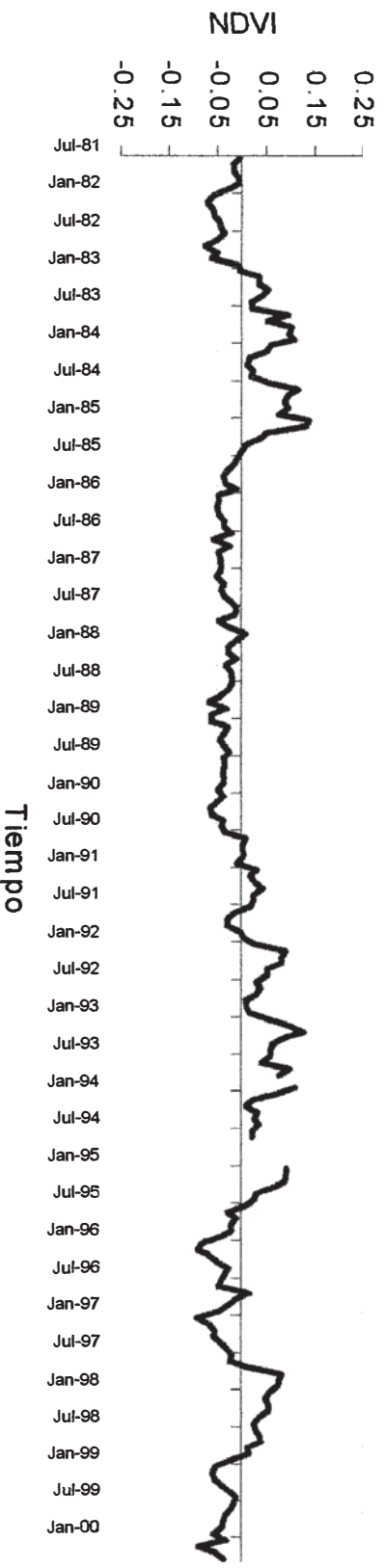


Figura 5. Variación interanual del NDVI en el grupo 2, asociado con matorral sarcocaula, y análisis de correlación cruzada entre este grupo y el IOS. La línea roja punteada indica el nivel de significancia de 0.05.

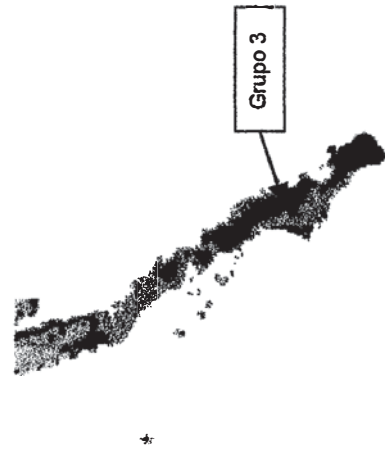
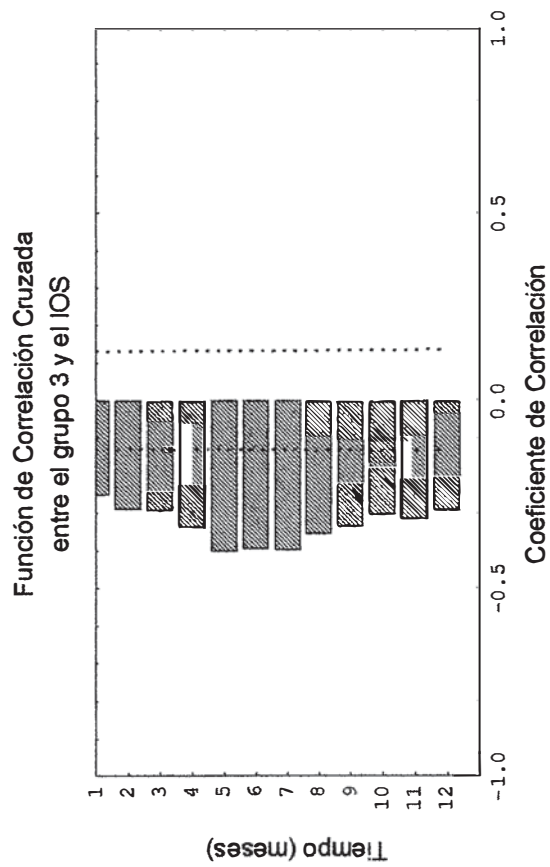
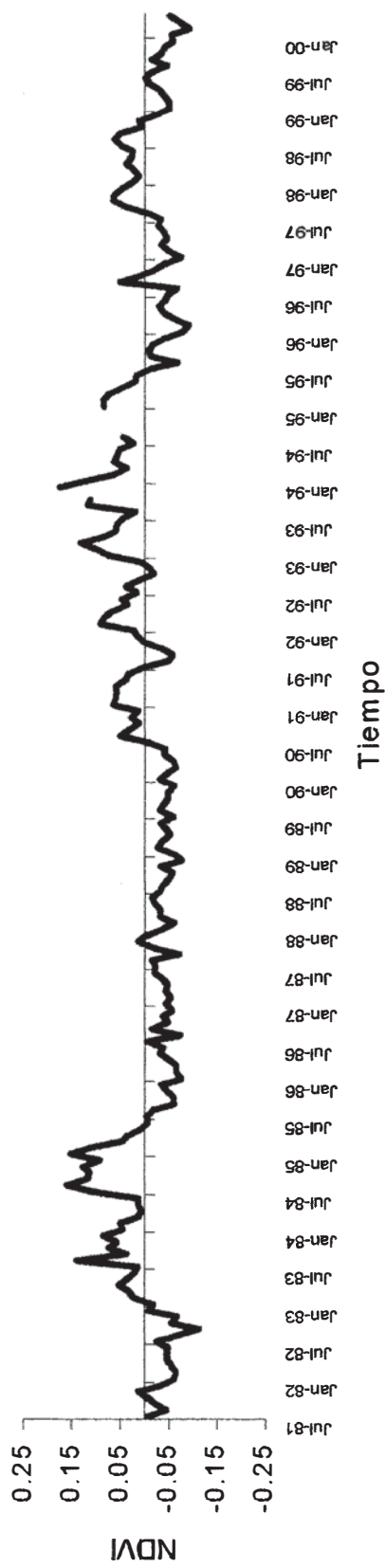


Figura 6. Variación interanual del NDVI en el grupo 3, asociado con cardonales y manglares, y análisis de correlación cruzada entre este grupo y el IOS. La línea roja punteada indica el nivel de significancia de 0.05

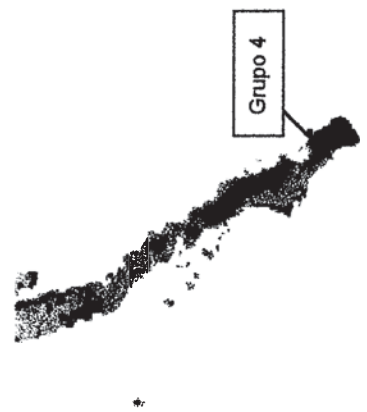
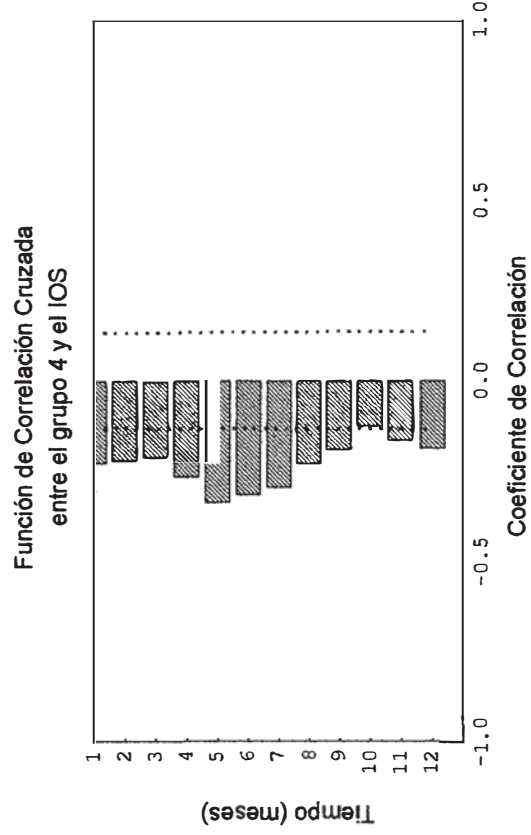
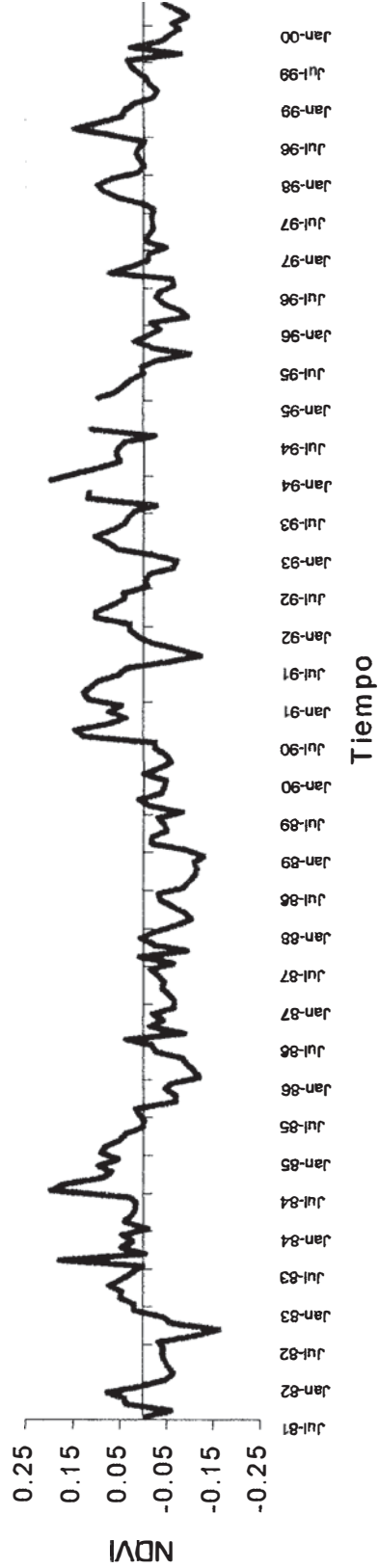


Figura 7. Variación interanual del NDVI en el grupo 4, asociado con la selva baja caducifolia, y análisis de correlación cruzada entre este grupo y el IOS. La línea roja punteada indica el nivel de significancia de 0.05

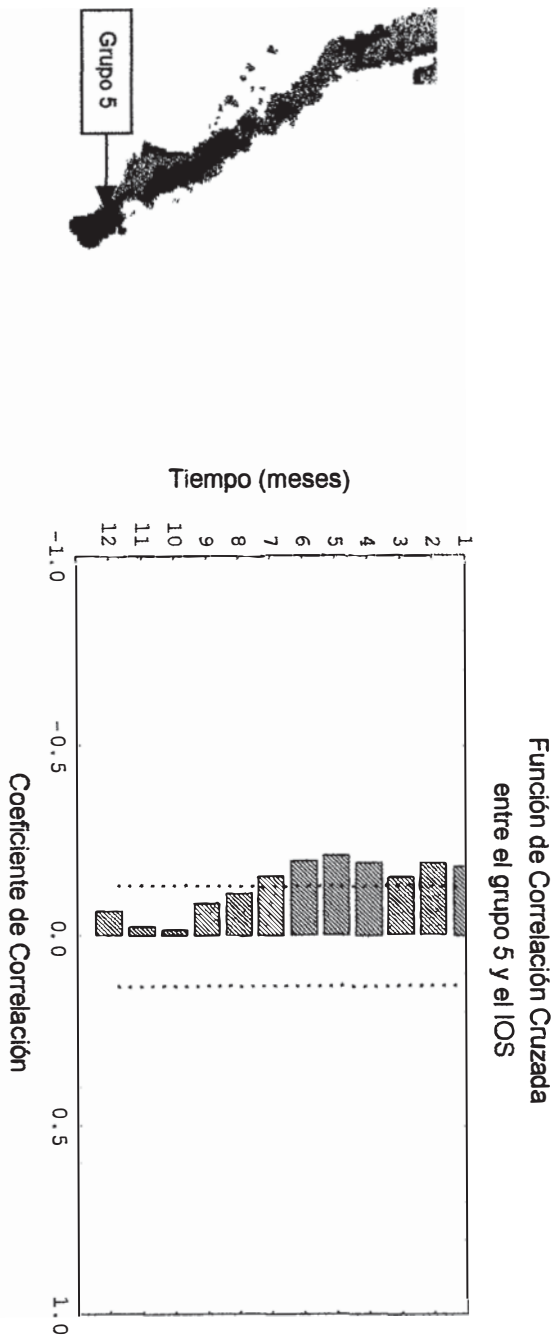
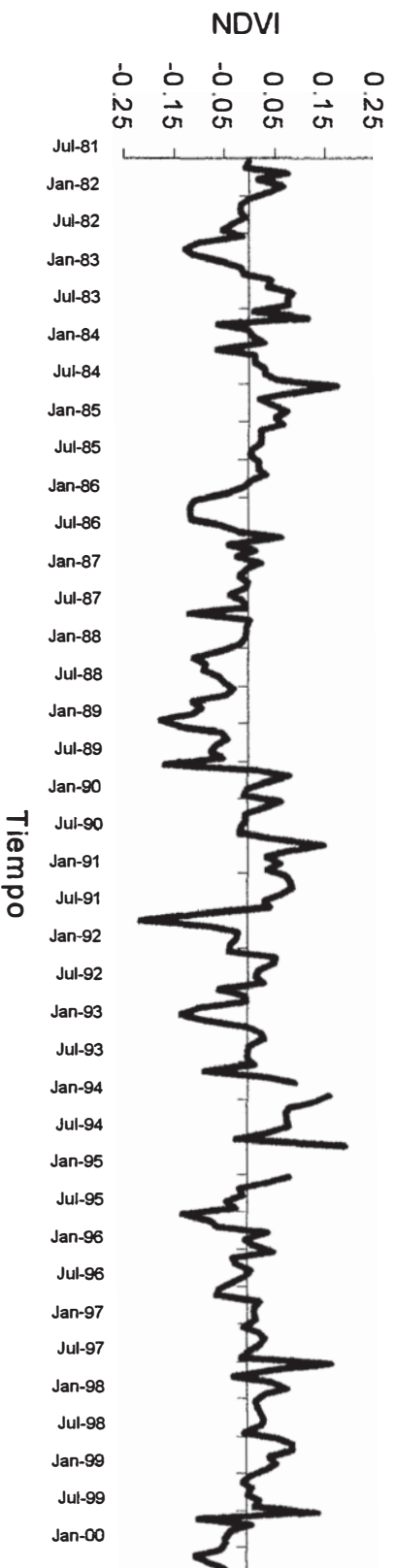


Figura 8. Variación interanual del NDVI en el grupo 5, asociado con el bosque de encino y de encino-pino, y análisis de correlación cruzada entre este grupo y el IOS. La línea roja punteada indica el nivel de significancia de 0.05

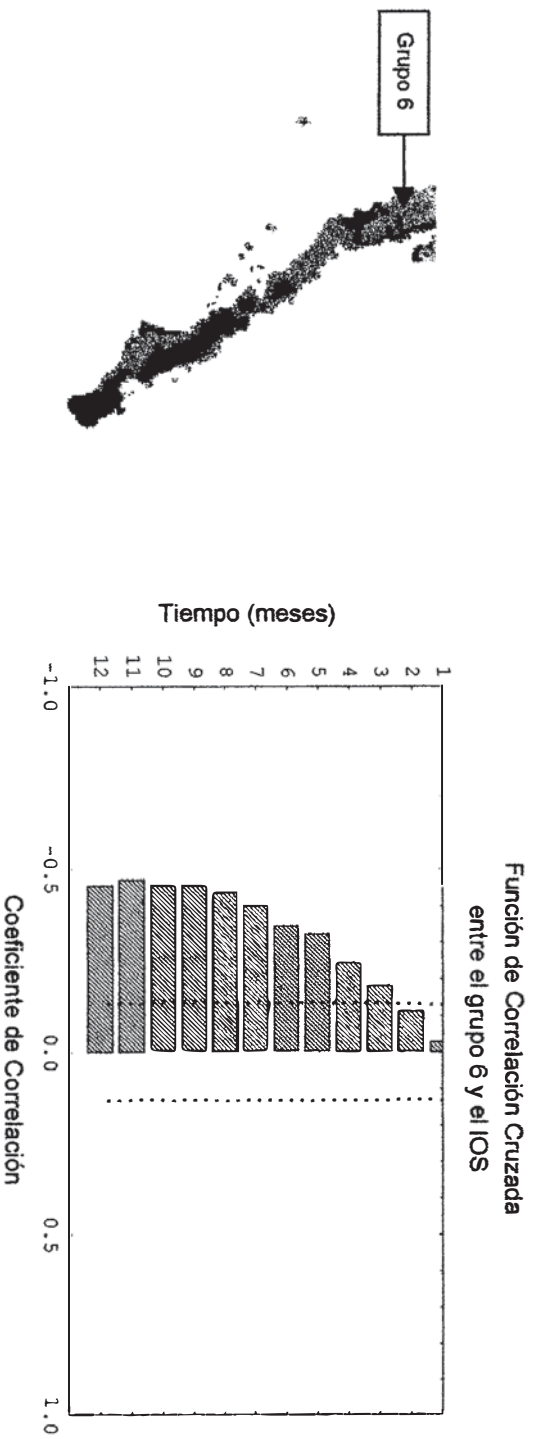
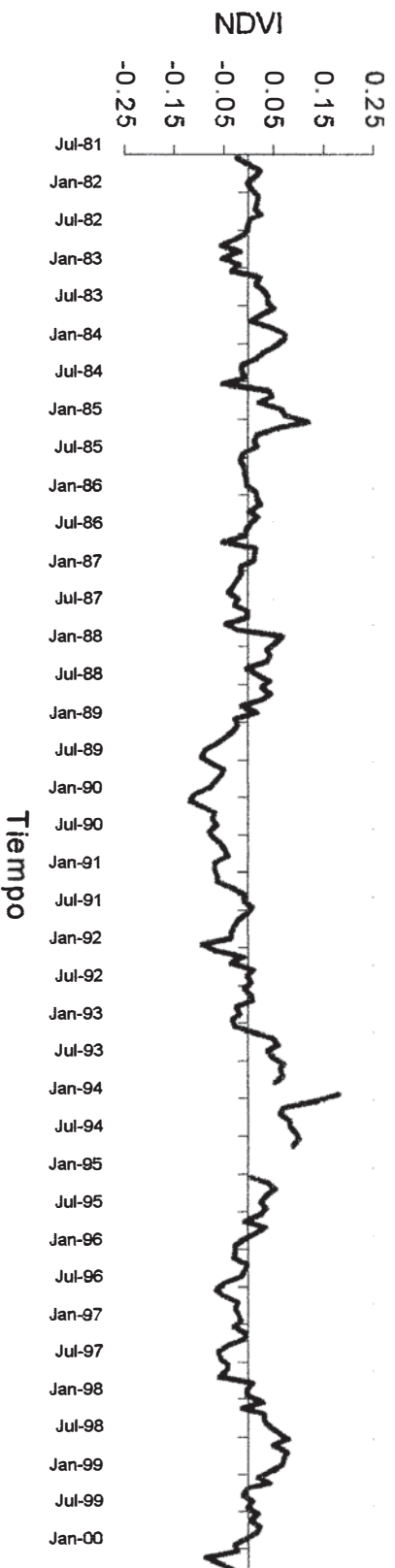


Figura 9. Variación interanual del NDVI en el grupo 6, asociado con la vegetación de tipo chaparral y bosque de coníferas de afinidad mediterránea, y análisis de correlación cruzada entre este grupo y el IOS. La línea roja punteada indica el nivel de significancia de 0.05



## DISCUSION

El análisis de información satelital hace posible la revisión de la variabilidad interanual de la vegetación en áreas extensas, como es el caso de la península de Baja California; tradicionalmente, a esta escala se tenía que deducir propiedades basadas sobre mediciones tomadas a escalas más finas. Sabemos que todas las comunidades varían marcadamente a través del tiempo y del espacio, y que estas variaciones ocurren a diferentes escalas tanto temporal (días, meses, años) como espacialmente (desde  $\text{cm}^2$  hasta  $\text{km}^2$ ). En las zonas áridas se detecta una dramática variabilidad espacial, la cual se atribuye a la marcada heterogeneidad ambiental, que influye en la distribución y abundancia de grupos particulares, después en la composición de especies, relaciones alimenticias y en la red de energía de la comunidad (Polis, 1986). La estrecha relación con el ambiente se debe a la gran lucha que las plantas enfrentan con éste al tratar de sobrevivir bajo condiciones poco favorables o adversas, por lo que tiene mayor importancia incluso que la lucha con otras plantas (Shreve y Wiggins, 1964).

La península de Baja California forma parte de la región árida del noroeste de México y tal como se aprecia en los resultados sobre la variación interanual del NDVI, podemos confirmar que la vegetación que soporta la región se ve favorecida por la ocurrencia de El Niño. Esta afirmación se demuestra con el ACC, ya que todos los grupos con patrón de lluvias de verano manifiestan relación estadísticamente significativa desde el primer mes de iniciado el fenómeno, siendo máxima la relación con cinco meses de retraso.

Posiblemente debido a la distancia geográfica que existe entre la región de estudio y el centro de origen del ENSO (el Ecuador) y el tiempo que requiere la planta para responder con una mayor producción de clorofila.

Asimismo, en estas series se aprecia la influencia de los cuatro últimos registros históricos más fuertes del evento El Niño (1982-1983, 1986-1987, 1991-1992 y 1997-1998); sin embargo, se presentan otros valores grandes del NDVI que no se asocian a la ocurrencia de este evento. Tal es el caso de los grupos 4 y 5, en los que se observan valores altos en el vigor de la vegetación durante 1990. Este resultado probablemente se relaciona con abundantes lluvias asociadas a la condición térmica anómala que ocurrió durante este año en las aguas oceánicas adyacentes a la costa occidental de la península de Baja California (Salinas-Zavala *et al.*, 1992).

Es posible apreciar en las series de tiempo valores máximos asociados al periodo cuando fue lanzado el satélite NOAA-9 (Diciembre de 1985) y el segundo al periodo en el cual fue reemplazado el satélite NOAA-14 (Enero de 1994). Por lo cual, las fluctuaciones registradas en el NDVI en estas fechas pueden deberse a la eficiencia del sensor al cambiar de un satélite a otro, más que a variaciones de largo plazo de la condición de la vegetación. Las correcciones y modificaciones que se han hecho a las lecturas del sensor están compiladas en la pagina de Internet siguiente: <<http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/podug/html/e/app-e.htm>>; Lo anterior sugiere la realización de trabajos de campo para la validación y calibración de los datos del NDVI para la región de estudio.

Son varios los trabajos que mencionan la relación directa que se da entre el NDVI y la precipitación. Para fines de comparación con este estudio, se consideró la propuesta por García y Mosiño (1968), que muestra las isoyetas medias anuales para ubicar de manera aproximada las zonas secas y las húmedas de la península (figura 10). Las áreas más húmedas coinciden con las que destacaron con mayores valores del NDVI; y el valor del índice disminuye a medida que la zona es más seca.

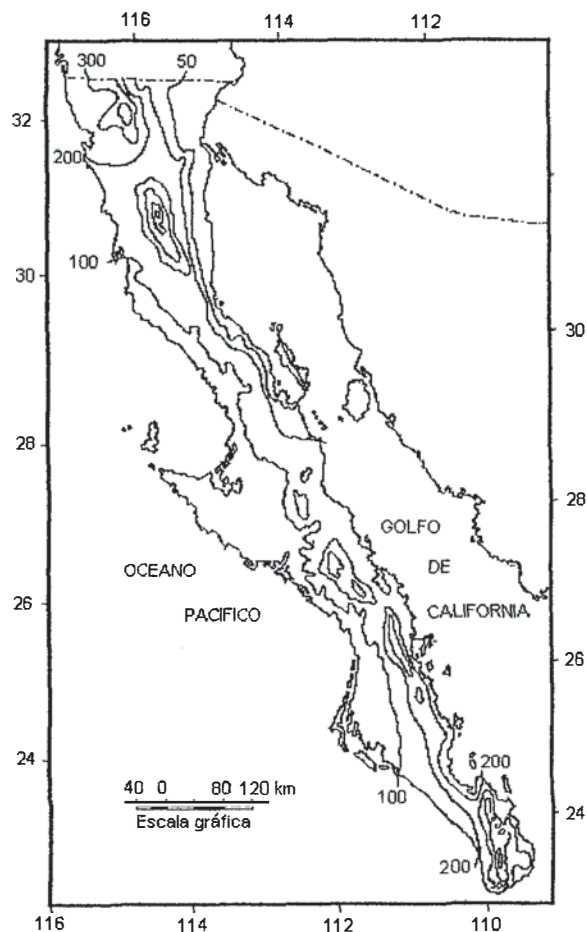


Figura 10. Mapa de isoyetas medias anuales (mm) para la península de Baja California (tomado de García y Mosiño, 1968).

Aunque se ha demostrado que esta relación no es sencilla, ya que otros factores aparte de la lluvia tienen gran influencia sobre el NDVI, tal como las características texturales de los suelos (Nicholson y Farrar, 1994). Es importante aclarar que en este tipo de ambientes las lluvias son muy irregulares, y tiene diferente efecto sobre la vegetación si es una sola lluvia abundante, que varias de poca duración; ya que el contenido de humedad que se almacena en el suelo es diferente.

El estudio que Schmidt y Karnieli (2000) realizaron en el desierto de Negev Israel, muestra que en un ambiente rocoso, los distintos componentes de la vegetación (proporción de plantas perennes, anuales y líquenes) contribuyen de manera distinta a los valores del NDVI; los líquenes son los más sensibles a la humedad, ya que responden durante el primer mes de lluvia, las anuales cubren la tierra después de varios eventos de lluvias intensas, pero permanecen por más tiempo que los primeros, y los perennes muestran su mayor respuesta hacia el final de la temporada de lluvias. Sin embargo, al integrar los tres componentes, se observa la típica respuesta a la lluvia; y de los tres componentes, la mejor correlación con la lluvia la presentaron las plantas anuales. Esta correlación no es evidente en un ambiente arenoso, lo que se atribuye a la sobreposición de estratos de vegetación.

Particularmente, Nicholson y Farrar (1994) examinaron la variabilidad interanual del NDVI en Botswana de 1982 a 1987 y su relación con la lluvia, evaluando en seis estaciones representando seis formaciones de vegetación y seis tipos de suelo. El estudio demostró una relación lineal entre la lluvia y el NDVI mientras que la lluvia no exceda 500 mm al año; sobre estos límites

ocurre una respuesta de saturación y el NDVI incrementa solo muy lentamente. Asimismo, el NDVI varió con la vegetación y el tipo de suelo; no obstante, parece estar mas relacionado con este último.

Derivado del análisis realizado en este trabajo, se puede concluir que existe una respuesta diferencial de la vegetación a la variación interanual del clima en la península de Baja California. De los grupos con tipo de patrón de verano, se puede mencionar que el grupo 1 correspondiente a las porciones costeras de la región asociado a vegetación halófitas, mostró la menor variación (Figura 4); es decir, el índice en muy pocas ocasiones sobrepasa valores mayores a 0.05. Es posible que este resultado se deba a la permanencia de este tipo de vegetación a lo largo del año, ya que tiene la capacidad de aprovechar el agua salobre y se favorece con la poca precipitación que llegue a presentarse. Por otro lado las marcadas variaciones observadas en los grupos 4 y 5, que se puede asociar a la vegetación de encino-pino y parte de la selva baja caducifolia de las porciones más elevadas de la región septentrional de la península (figuras 7 y 8), pueden deberse a la característica caducifolia de las especies estructuralmente dominantes. Esta propiedad de tirar las hojas en la estación desfavorable resulta en valores extremadamente bajos de reflectancia. El cambio repentino en valores altos de vigor en la vegetación (NDVI) se asocia con el desarrollo de nuevas estructuras foliares de las copas de los árboles y de los arbustos durante la época de lluvias, cabe mencionar que es la zona donde ocurre la mayor incidencia de precipitación en el estado de Baja California Sur. Sin embargo, es importante realizar estudios de campo para validar esta suposición.

La regionalización resultante del análisis del NDVI, muestra a *grosso modo*, los patrones de vegetación que presentan una respuesta semejante a las condiciones ambientales; es decir, los foteles con características semejantes de “verdor” y variación estacional se reúnen en un mismo grupo. Se observa una clara relación con las características fisiográficas del terreno sobre el cual se localizan; lo que Shreve y Wiggins (1964) citan como el control fisiográfico de la vegetación. Estos autores proponen una regionalización fitogeográfica para la península, y aunque toman en cuenta otras condiciones, se basan principalmente en características intrínsecas de las plantas (figura 11).

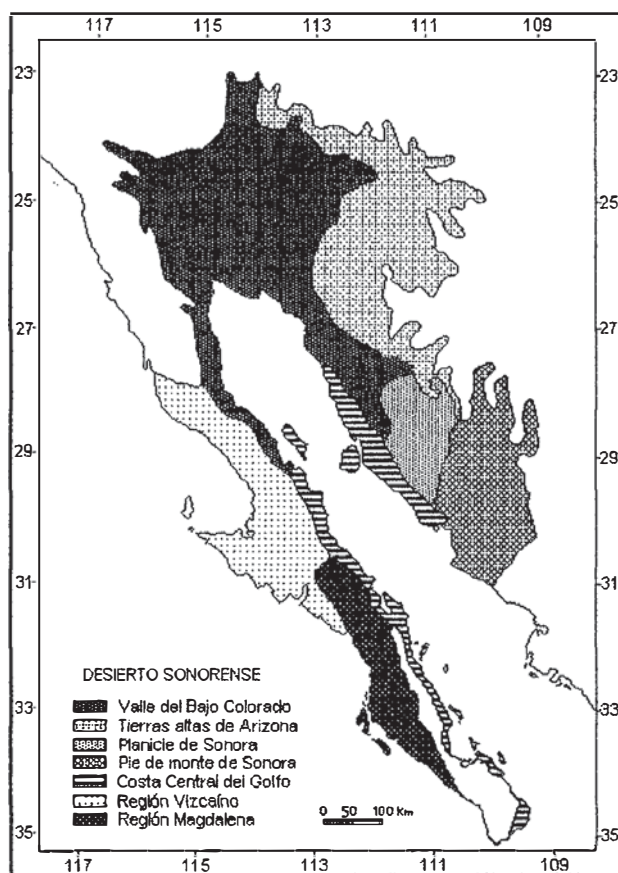


Figura 11. Regionalización fitogeográfica de la península de Baja California (tomado de Shreve y Wiggins, 1964).

Sin embargo, reconocen que la heterogeneidad espacial a gran escala está determinada principalmente por los patrones de precipitación y de infiltración de agua en el suelo, condición que es muy irregular en el desierto. Al comparar la regionalización propuesta por estos autores, con la que se presenta en este trabajo; se puede apreciar que la división de sus regiones coincide con el parteaguas que divide a la vertiente del Océano Pacífico y la del Golfo de California, además de las divisiones que presentan en sentido latitudinal. A pesar de que la regionalización del NDVI esta basada en distintas propiedades de la vegetación asociadas mas bien con su vigor, y por lo tanto, no coincide con el patrón descrito anteriormente, es interesante notar que la región de la Sierra de la Laguna con base en los datos del NDVI (grupos 4 y 5) se extiende a la Sierra de La Giganta y hasta la Sierra de San Francisco, que actualmente son consideradas dentro del Desierto Sonorense.

En la regionalización que se propone en este trabajo se evidencian los tres grandes tipos climáticos que reconoce Alcaraz, *et al.*, (1999) para la península de Baja California, ya que con el análisis de conglomerados se agruparon de manera consistente los foteles del grupo 6, representando a la vegetación asociada a clima mediterráneo. Los foteles de la porción septentrional de la península correspondiente a las condiciones más méxicas, se agruparon en los grupos 4 y 5; y la vegetación típica de clima desértico en este caso esta representada por los grupos 1, 2 y 3. La Región del Cabo corresponde a los grupos 4 y 5, el desierto sonorense comprende los grupos 1, 2 y 3; y la vegetación de tipo mediterráneo al grupo 6.

Obviamente, al analizar grandes escalas espaciales y temporales se pierden detalles a niveles más finos; y por el contrario, estudios basados en condiciones climáticas locales permiten inferir sobre atributos de las especies, pero sus alcances espaciales y temporales son muy limitados. Por ejemplo, el trabajo desarrollado por Craig *et al.* (1999), combina un modelo de clima local con la distribución espacial de 8 especies para simular la distribución potencial de plantas al ocurrir cambio en el tiempo. Sin embargo, sus limitaciones en las resoluciones tanto espacial como temporal se manifiestan.

El conocimiento de la variabilidad estacional y temporal a gran escala, como en este caso para la Península de Baja California, permitirá enmarcar en un contexto más amplio, los resultados que presentan estudios mas finos, ya sea al nivel de comunidades o de poblaciones. Por ejemplo, el estudio dendroclimático realizado por Díaz y Salinas (2000) donde se detectó el efecto de las abundantes precipitaciones de años Niño en el análisis de los anillos de crecimiento del pino piñonero *Pinus lagunae* M-F. Passini. En este trabajo también se relacionan condiciones de extrema sequía al presentarse el fenómeno contrario (La Niña).

Una línea de investigación a seguir es conocer que otros factores climáticos regionales están influyendo en la variabilidad interanual observada en el NDVI, y de que manera es esta relación. Asimismo, resultaría importante corroborar en campo las suposiciones que surgen a partir de este trabajo, como por ejemplo, que los valores del NDVI reflejen la respuesta a la precipitación de los dominantes estructurales de la vegetación, lo cual puede hacerse mediante el análisis de distribuciones de plantas ya documentadas; para ello una buena



fuentes de información se encuentran en el Atlas de las Plantas del Desierto de Sonora publicado por Turner *et al.* (1995). Asimismo, revisar que en las áreas con escasa vegetación, como es el caso de el grupo 1, los valores del NDVI sean una medida de la vegetación y no de la humedad del suelo, como lo demuestran en su estudio Nicholson y Farrar (1994).

Finalmente, con base en los resultados obtenidos, se puede considerar que se cumplieron los objetivos propuestos:

- Se generó una regionalización de la península de Baja California con base en la variación interanual de los valores promedio del NDVI durante el periodo comprendido entre julio de 1981 y marzo del 2000.
- Se obtuvieron las series de las fluctuaciones interanuales para cada uno de los grupos o regiones, las cuales muestran una correlación altamente significativa con el Índice de Oscilación del Sur, indicador de El Niño. De manera general, se puede decir que la vegetación de la península presenta una respuesta a las condiciones El Niño, que se extiende hasta 5 meses después de que se ha desencadenado el fenómeno en su centro de origen.
- Estos resultados permitirán enmarcar en un contexto más amplio las variaciones interanuales que se observen en estudios a escalas más finas.

## LITERATURA CITADA

Alcaráz A.F. M.J. Delgado I. y J. López. 1999. Estudio de las relaciones clima-vegetación potencial a través del análisis multivariante en Baja California, México. Tercer Simposio Botánico de la Península de Baja California. La Paz, Baja California Sur; México. 51 pp

Alvarez-Castañeda, S.T., C.A. Salinas-Zavala y F. De Lachica. 1995. Análisis Biogeográfico del Noroeste de México con énfasis en la variación climática y mastozoológica. Acta Zool. Mex.. Nueva Serie, 66: 59-86 pp

Anyamba, A. y J.R. Eastman. 1996. Interannual variability of NDVI over Africa, and its relation to El Niño/Southern Oscillation. Int. J. Remote Sensing. 12(13): 2533-2548 pp

Axelrod, D. I. 1979. Age and Origin of Sonoran Desert Vegetation. Occasional papers of the California Academy of Sciences. No. 132, 74 pp

Craig, R., L. Shiozawa, J. Betancourt, E. Pierson y T. Burgess. 1999. Que puede decirnos un modelo climático sobre la vegetación del Desierto Sonorense?. Tercer Simposio Botánico de la Península de Baja California. La Paz, Baja California Sur; México. 13 pp

Di, L., D.C. Rundquist y L. Han. 1994. Modeling relationships between NDVI and precipitation during vegetative growth cycles. Int. J. Remote Sensing. 15(10): 2121-2136 pp

Díaz, C.S. y C.A. Salinas-Zavala., 2000. Documented Validation of Extreme Precipitation Events Reconstructed for Northwest Mexico (1860-1997). En: Proceedings of the Sixteenth Annual Pacific Climate Workshop. West G.J. and Buffalo L. (Ed). 41-46 pp

Farrar, T.J., S.E. Nicholson and A.R. Lare. 1994. The influence of soil type on the relationship between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana. LI. NDVI Response to soil moisture. Remote Sens. Environ. 50: 121-133 pp

García, E. y P. Mosiño. 1968. Los climas de Baja California. Memoria 1966-1967 del Comité Nacional para el Decenio Hidrológico Internacional. Instituto de Geografía, U.N.A.M. México. 44 pp

Glantz, H.M. 1991. Introduction. En: M.H. Glantz, R.W. Katz y N. Nicholls (Ed). Teleconnections Linking Worldwide Climate Anomalies. Cambridge University Press. 1-12 pp

Hasting, J.R. and R.M. Turner. 1965. Seasonal Precipitation Regimes in Baja California Mexico. *Geografiska Annaler*. 204-223 pp

Hlavka, C.A. and Strong, L.L. 1992. Assessing deforestation and habitat fragmentation in Uganda using satellite observations and fractal analysis. *J. Imag. Sci. and Tech.* 36 (5): 440-445 pp

Hobbs, T.J. 1997. Atmospheric correction of NOAA-11 NDVI data in the arid rangelands of Central Australia. *Int. J. Remote Sensing*. 18(5): 1051-1058

Kozoderov, V.V. and Kosolapov, V.S. 1993. Models to assess the soil and vegetation state from multispectral satellite data. *Earth Res. From Space*. 5: 33-50 pp

Mosiño, P. 1966. Factores determinantes del clima en la República Mexicana con relación especial a las zonas áridas. S.E.P. Ins, Nac. Antrop., Depto. De prehistoria. Publ. no. 19. 22 pp

Nicholson, S.E. y T.J Farrar. 1994. The Influence of Soil Type on the Relationships between NDVI, Rainfall, and Soil Moisture in Semiarid Botswana. I. NDVI Response to Rainfall. *Remote Sens. Environ.* 50:107-120.

Polis, G. A. 1986. Desert Communities: An overview of patterns and Processes. Chapter 1 in: *The Ecology of Dessert Communities*. Polis G.A. (Ed.)

Rzedowski, J. 1978. *Vegetación de México*. Limusa (Ed). México. 432 pp.

Salinas-Zavala C.A, D.B. Lluch-Cota, S. Hernández-Vázquez y D. Lluch Belda. 1992. Anomalías de precipitación en Baja California Sur durante 1990. Posibles causas. *Atmósfera* 5(2): 79-93 pp

Schmidth, H. y A. Karnieli. 2000. Remote sensing of the seasonal variability of vegetation in a semi-arid environment. *J. Arid Environ.* 45: 43-59

Shreve, F. e I. Wiggins. 1964. *Vegetation and Flora of the Sonoran Desert*. 2 vols. Standford University Press. California, U.S.A. 1740 pp.

Statística, 1993. Anónimo. Statsoft, versión 4.5. Microsoft Corporation.

Surfer32, 1995. *Surface Mapping System*, versión 6.01. Golden Software Inc. Colorado, U.S.A.

Trenberth, E.K. 1991. General Characteristics of El Niño-Southern Oscillation. En: M.H. Glantz, R.W. Katz y N. Nicholls (Ed). Teleconnections Linking Worldwide Climate Anomalies. Cambridge University Press. 13-40 pp

Wiggins, I. 1980. Flora of Baja California. Stanford University Press. California, U.S.A. 1025 pp

Páginas de Internet consultadas:

<http://eosdata.gsfc.nasa.gov>

<http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/podug/html/e/app-e.htm>

<http://perigee.ncdc.noaa.gov/docs/gviug/cover.htm#top>

<http://www.cdc.noaa.gov/~kew/MEI/>

## LITERATURA CITADA

Alcaráz A.F. M.J. Delgado I. y J. López. 1999. Estudio de las relaciones clima-vegetación potencial a través del análisis multivariante en Baja California, México. Tercer Simposio Botánico de la Península de Baja California. La Paz, Baja California Sur; México. 51 pp

Alvarez-Castañeda, S.T., C.A. Salinas-Zavala y F. De Lachica. 1995. Análisis Biogeográfico del Noroeste de México con énfasis en la variación climática y mastozoológica. *Acta Zool. Mex.*. Nueva Serie, 66: 59-86 pp

Anyamba, A. y J.R. Eastman. 1996. Interannual variability of NDVI over Africa, and its relation to El Niño/Southern Oscillation. *Int. J. Remote Sensing*. 12(13): 2533-2548 pp

Axelrod, D. I. 1979. Age and Origin of Sonoran Desert Vegetation. Occasional papers of the California Academy of Sciences. No. 132, 74 pp

Craig, R., L. Shiozawa, J. Betancourt, E. Pierson y T. Burgess. 1999. Que puede decirnos un modelo climático sobre la vegetación del Desierto Sonorense?. Tercer Simposio Botánico de la Península de Baja California. La Paz, Baja California Sur; México. 13 pp

Di, L., D.C. Rundquist y L. Han. 1994. Modeling relationships between NDVI and precipitation during vegetative growth cycles. *Int. J. Remote Sensing*. 15(10): 2121-2136 pp

Díaz, C.S. y C.A. Salinas-Zavala., 2000. Documented Validation of Extreme Precipitation Events Reconstructed for Northwest Mexico (1860-1997). En: *Proceedings of the Sixteenth Annual Pacific Climate Workshop*. West G.J. and Buffaloe L. (Ed). 41-46 pp

Farrar, T.J., S.E. Nicholson and A.R. Lare. 1994. The influence of soil type on the relationship between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana. LI. NDVI Response to soil moisture. *Remote Sens. Environ*. 50: 121-133 pp

García, E. y P. Mosiño. 1968. Los climas de Baja California. Memoria 1966-1967 del Comité Nacional para el Decenio Hidrológico Internacional. Instituto de Geografía, U.N.A.M. México. 44 pp

Glantz, H.M. 1991. Introduction. En: M.H. Glantz, R.W. Katz y N. Nicholls (Ed). *Teleconnections Linking Worldwide Climate Anomalies*. Cambridge University Press. 1-12 pp

Hasting, J.R. and R.M. Turner. 1965. Seasonal Precipitation Regimes in Baja California Mexico. *Geografiska Annaler*. 204-223 pp

Hlavka, C.A. and Strong, L.L. 1992. Assessing deforestation and habitat fragmentation in Uganda using satellite observations and fractal analysis. *J. Imag. Sci. and Tech.* 36 (5): 440-445 pp

Hobbs, T.J. 1997. Atmospheric correction of NOAA-11 NDVI data in the arid rangelands of Central Australia. *Int. J. Remote Sensing*. 18(5): 1051-1058

Kozoderov, V.V. and Kosolapov, V.S. 1993. Models to assess the soil and vegetation state from multispectral satellite data. *Earth Res. From Space*. 5: 33-50 pp

Mosiño, P. 1966. Factores determinantes del clima en la República Mexicana con relación especial a las zonas áridas. S.E.P. Ins, Nac. Antrop., Depto. De prehistoria. Publ. no. 19. 22 pp

Nicholson, S.E. y T.J Farrar. 1994. The Influence of Soil Type on the Relationships between NDVI, Rainfall, and Soil Moisture in Semiarid Botswana. I. NDVI Response to Rainfall. *Remote Sens. Environ.* 50:107-120.

Polis, G. A. 1986. Desert Communities: An overview of patterns and Processes. Chapter 1 in: *The Ecology of Dessert Communities*. Polis G.A. (Ed.)

Rzedowski, J. 1978. *Vegetación de México*. Limusa (Ed). México. 432 pp.

Salinas-Zavala C.A, D.B. Lluch-Cota, S. Hernández-Vázquez y D. Lluch Belda. 1992. Anomalías de precipitación en Baja California Sur durante 1990. Posibles causas. *Atmósfera* 5(2): 79-93 pp

Schmidth, H. y A. Karnieli. 2000. Remote sensing of the seasonal variability of vegetation in a semi-arid environment. *J. Arid Environ.* 45: 43-59

Shreve, F. e I. Wiggins. 1964. *Vegetation and Flora of the Sonoran Desert*. 2 vols. Stanford University Press. California, U.S.A. 1740 pp.

Statistica, 1993. Anónimo. Statsoft, versión 4.5. Microsoft Corporation.

Surfer32, 1995. Surface Mapping System, versión 6.01. Golden Software Inc. Colorado, U.S.A.

Trenberth, E.K. 1991. General Characteristics of El Niño-Southern Oscillation. En: M.H. Glantz, R.W. Katz y N. Nicholls (Ed). Teleconnections Linking Worldwide Climate Anomalies. Cambridge University Press. 13-40 pp

Wiggins, I. 1980. Flora of Baja California. Stanford University Press. California, U.S.A. 1025 pp

Páginas de Internet consultadas:

<http://eosdata.gsfc.nasa.gov>

<http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/podug/html/e/app-e.htm>

<http://perigee.ncdc.noaa.gov/docs/gviug/cover.htm#top>

<http://www.cdc.noaa.gov/~kew/MEI/>