

Análisis Multitemporal de Imágenes PAL para el estudio de la vegetación en Suramérica

Y. Julien¹, J. A. Sobrino¹, L. Morales²

¹ *Global Change Unit, Department of Thermodynamics, University of Valencia
c/ Dr Moliner, 50, 46100, Burjassot, Spain.*

² *Departamento de Física, Universidad Tecnológica Metropolitana, Av. José Pedro Alessandri 1242,
Casilla 9845, Santiago, Chile, & Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos
Naturales Renovables, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile,
A. Santa Rosa 11315, Casilla 1004, Santiago, Chile.*

RESUMEN

En el presente trabajo ha sido aplicado un algoritmo de cálculo de temperatura de superficie a todo el conjunto de la base de datos Pathfinder AVHRR Land (PAL), con el objeto de estudiar la evolución de la vegetación en América del Sur. Este parámetro, junto con el NDVI, permitirá observar los cambios en la vegetación entre Julio del 1981 y Septiembre del 2001. Asimismo, una clasificación de la zona de estudio ha sido realizada, basada en los tipos de vegetación y los regímenes térmicos, a través del NDVI y del dato de temperatura del aire a 2 metros de altura proporcionado por la base de datos Reanalysis. Así, la diferenciación entre las áreas que presentan una vegetación similar, pero una climatología muy diferente, es posible, como ocurre por ejemplo en las regiones tropicales y montañosas. La evolución de la temperatura de superficie en el periodo estudiado es muy dependiente del satélite correspondiente y de la deriva de la órbita, lo que necesita de una adecuada corrección. El NDVI se ve muy afectado por la erupción del Monte Pinatubo en Junio del 1991, que corrompe temporalmente los datos.

PALABRAS CLAVE: Temperatura de Superficie, NDVI, clasificación, PAL.

ABSTRACT

In this paper, an algorithm has been applied to the calculation of land surface temperature to the whole Pathfinder AVHRR Land (PAL) database, in order to study the evolution of the vegetation in South America. This parameter, along with NDVI, will allow the observation of changes of the vegetation between July of 1981 and September of 2001. A classification of the study area has been also realized, which is based upon vegetation types and thermal patterns, through PAL's NDVI data and Reanalysis' Air Temperature at 2 meters height. This way can be distinguished areas which present similar vegetation, but different climatology, as for example tropical and mountainous zones. The land surface temperature evolution during the studied period shows a strong dependency with the corresponding satellite and with orbital drift, which needs an adequate correction. The NDVI data show the impact of Mount Pinatubo's eruption of June 1991, which corrupts temporarily the data.

KEY WORDS: Land Surface Temperature, NDVI, classification, PAL.

INTRODUCCIÓN

Hasta el momento, Pathfinder AVHRR Land (PAL) es la base de imágenes de satélite de mayor extensión temporal y espacial disponible en lo que concierne al visible y al infrarrojo térmico. La base de imágenes de satélite GIMMS es una versión mejorada de PAL en el caso del NDVI, tomando en cuenta los efectos de deriva de órbita y de contaminación por los aerosoles volcánicos. Su utilización para el seguimiento de la vegetación ha sido principalmente centrada en el hemisferio norte, como se

refleja en varios trabajos (Myneni *et al.*, 1997; Tucker *et al.*, 2001; Zhou *et al.*, 2001; Bogaert *et al.*, 2002; Zhou *et al.*, 2003). Esos trabajos han identificado una tendencia a la aumentación de la vegetación, en particular en Eurasia (Myneni *et al.*, 1997; Tucker *et al.*, 2001; Zhou *et al.*, 2001), donde la tendencia es persistente (Bogaert *et al.*, 2002), y donde la temporada de crecimiento se ha extendido (Zhou *et al.*, 2003).

Para estudios de zonas de gran extensión espacial, como, en el caso que nos interesa, América del Sur, la diferencia entre los diferentes tipos de vege-

tación (del desierto de Atacama a las selvas tropicales del Amazonas) y el tamaño de la serie de datos implican el uso de una clasificación para analizar las evoluciones temporales de las diferentes clases. Existen varias clasificaciones en la literatura (por ejemplo, la clasificación IGBP del USGS-United States Geological Survey), pero han sido elaboradas a partir de datos conseguidos durante un año, o un promedio de años, lo que implica que su uso para la detección de cambios es difícil. Por esas razones, una clasificación realizada a partir de los propios datos es necesaria.

A continuación se presentan los algoritmos usados para determinar la temperatura de superficie, a través de la estimación de la emisividad y del contenido total en vapor de agua atmosférico, para posteriormente realizar una clasificación de la zona de estudio y finalizar con la presentación de los resultados obtenidos.

METODOLOGÍA

Esta parte está dividida en cuatro apartados, en los que se presentan la zona de estudio, las bases de datos utilizados, los algoritmos empleados, así como el método de clasificación de la zona.

2.1. Zona de estudio

La zona considerada para este estudio es América del Sur, con las siguientes coordenadas: longitud de 90°W a 30°W, latitud de 20°N a 60°S. Esta zona presenta una gran variedad: desiertos (Atacama en Chile), zonas semi-áridas (Patagonia), regiones polares (Terra del Fuego), selva tropical (Amazonas), cultivos (por ejemplo cereales, en la costa de Brazil), alta montaña (los Andes).

La cobertura nevosa permanece durante gran parte del año en las Andes y en las zonas del sur del continente, mientras que la zona ecuatorial es sujeta a precipitaciones a lo largo de todo el año, la cobertura nubosa pudiendo permanecer durante semanas.

2.2. Datos

2.2.1. Pathfinder AVHRR Land (PAL)

PAL proporciona imágenes globales de la Tierra a una resolución espacial de 8-8 km, y a una resolución temporal de 10 días, desde Julio del 1981 hasta

Septiembre del 2001. 5 imágenes están proporcionadas para cada periodo de 10 días, una en el visible (canal 1), una en el infrarrojo próximo (canal 2), dos en el infrarrojo térmico (canales 4 y 5), así como una imagen de NDVI. Estas imágenes son obtenidas a partir del método llamado Maximum Value Compositing (MVC), que consiste en elegir para cada periodo de 10 días, y para cada píxel de la imagen, el día por el que el valor de NDVI es máximo, con el fin de disminuir, entre otros efectos, el de las nubes (Holben, 1986; James & Kalluri, 1994). En la base de datos PAL, los efectos atmosféricos están corregidos siguiendo el método de Gordon *et al.* (1988), que incluye una corrección de la absorción por el ozono (McPeters *et al.*, 1993)

2.2.2. Reanalysis

La base de datos Reanalysis es elaborada por el NCEP (National Center for Environmental Prediction) y el NCAR (National Center for Atmospheric Research), y contiene diferentes datos meteorológicos a una resolución de 2.5° por 2.5°, empezando en el año 1948, y es actualizada cada mes. Los datos están proporcionados a una resolución temporal desde horaria (cada 6 horas) a mensual (para más detalles, ver Kistler *et al.*, 2001).

2.3. Algoritmos

Para calcular la Temperatura de Superficie Terrestre utilizamos el método desarrollado por Sobrino & Raissouni (2000). Primero, estimamos la emisividad (a partir del NDVI) y luego el contenido total en vapor de agua atmosférico. Puesto que los datos de PAL están proporcionados sin filtrado de nubes a una escala continental, un algoritmo de detección de nubes ha sido desarrollado, que presentamos posteriormente.

2.3.1. NDVI

Este dato está proporcionado directamente en la base de datos PAL, puesto que se utiliza para elaborar las imágenes composites de 10 días. Calculamos el NDVI utilizando las reflectancias en el rojo (Ch1) y en el infrarrojo próximo (Ch2):

$$NDVI = \frac{(Ch2 - Ch1)}{(Ch2 + Ch1)} \quad (1)$$

Este dato será utilizado para estimar la emisividad.

2.3.2. Emisividad

Seguendo a Sobrino & Raissouni (2000), cada imagen ha sido dividida en tres zonas, dependiendo del valor de NDVI. Estimamos la emisividad media ϵ (promedio de las emisividades para los canales 4 y 5 del sensor AVHRR) y la variación espectral de emisividad $\Delta\epsilon$ (diferencia de emisividad entre ambos canales) de la manera siguiente:

- NDVI < 0.2

Consideramos que la superficie es un suelo desnudo, del que la emisividad se calcula a partir de la reflectancia en el canal 1:

$$\epsilon = 0.980 - 0.042 \cdot \text{Ch1} \quad (2)$$

$$\Delta\epsilon = -0.003 - 0.029 \cdot \text{Ch1} \quad (3)$$

- 0.2 < NDVI < 0.5

Consideramos que la superficie es una mezcla de suelo desnudo y de vegetación, de la que la emisividad se puede estimar a partir de la proporción de vegetación P_v :

$$\epsilon = 0.971 + 0.018 \cdot P_v \quad (4)$$

$$\Delta\epsilon = 0.006 \cdot (1 - P_v) \quad (5)$$

donde P_v se calcula a partir del propio NDVI (Carlson & Ripley, 1997):

$$P_v = (\text{NDVI} - 0.2)^2 / 0.09 \quad (6)$$

- NDVI > 0.5

Consideramos que la superficie corresponde a una vegetación homogénea, de la que se puede estimar la emisividad como:

$$\epsilon = 0.985 \quad (7)$$

$$\Delta\epsilon = 0 \quad (8)$$

Este método permite la estimación de la emisividad con un error de 0.01 (Sobrino *et al.*, 1999)

2.3.3. Contenido total en vapor de agua atmosférico

El contenido total en vapor de agua atmosférico es estimado con la tasa de varianza-covarianza (R_{54}), la cual se calcula a partir de un vecindario de píxeles de las imágenes en los canales 4 y 5:

$$R_{54} = \frac{\sum_{k=1}^N (T_{4k} - T_{40})(T_{5k} - T_{50})}{\sum_{k=1}^N (T_{4k} - T_{40})^2} \quad (9)$$

siendo T_{4k} y T_{5k} respectivamente las temperaturas radiométricas de cada píxel del vecindario considerado en las imágenes de los canales 4 y 5, y T_{40} y T_{50} son respectivamente los valores promedios para ese mismo vecindario en las imágenes de los canales 4 y 5.

Con esta tasa de varianza-covarianza estimamos el contenido total en vapor de agua atmosférico W:

$$W = 0.26 - 14.253 \cos(\theta) \ln R_{54} - 11.649 (\cos(\theta) \ln R_{54})$$

Este método (ver Sobrino *et al.*, 1999) proporciona una estimación del contenido total en vapor de agua atmosférico con un error de 0.5 g·cm⁻².

2.3.4. Temperatura de Superficie Terrestre

A partir de los valores estimados anteriormente (emisividad media, variación espectral de emisividad, vapor de agua), estimamos la Temperatura de Superficie Terrestre (T_s), usando la formula siguiente:

$$T_s = T_4 + 1.40 \cdot (T_4 - T_5) + 0.32 \cdot (T_4 - T_5)^2 + 0.83 + (57 - 5W) \cdot (1 - \epsilon) - (161 - 30W) \cdot \Delta\epsilon \quad (11)$$

Esta temperatura se obtiene con un error de 1.3 K (Sobrino & Raissouni, 2000)

2.3.5. Filtrado de nubes

Debido a la presencia de nubes durante periodos superiores a 10 días para algunas zonas de América del Sur (especialmente en el Amazonas), un filtrado adicional de nubes es necesario. Este filtrado se basa en el método de Saunders & Kriebel (1988) y utiliza los siguientes tres tests para detectar la presencia de píxeles contaminados de nubes:

- Ch1 < A AND $T_s < 280$ (12)

- $Q = \frac{R_2}{R_1} < 1.6$ AND $T_s < 280$ (13)

- $\Delta T = (T_4 - T_5) < B(T_4)$ (14)

siendo A un umbral dinámico establecido como tres veces el valor de reflectancia (del canal 1) que corresponde al promedio de los valores identificados como tierra, y donde $B(T_4)$ es un valor umbral función de la temperatura radiométrica T_4 (Saunders & Kriebel, 1988).

2.4. Clasificación

En este estudio hemos trabajado con la base de datos PAL en su integridad, recortando las imágenes a América del Sur. Esta base de datos contiene más de 700 imágenes de 801x601 píxeles. Por razones de tiempos de procesamiento, un estudio píxel-a-píxel de la evolución de varios parámetros, como NDVI o temperatura de superficie, es irrealista. Consecuentemente, los autores optaron por un análisis simplificado, que consiste en una clasificación de la zona de estudio. Para poder tomar en cuenta los cambios que podría haber sufrido la zona de estudio, una clasificación en función de los propios datos es imprescindible. En nuestro caso, la clasificación se debería elaborar a partir de los datos de LST y NDVI. Price (1991) ha mostrado que los datos térmicos medidos por los satélites NOAA sufren de una deriva de órbita, lo que vuelve ilusoria una clasificación basada en el dato de LST. Para construir la clasificación, los autores han elegido el dato de temperatura del aire que proporciona la base de datos Reanalysis, por ser un dato muy correlado al de LST, a través de la cobertura vegetal en particular.

Asimismo, la clasificación utilizada en este trabajo esta elaborada a partir de dos clasificaciones previas. La primera clasificación identifica la dinámica temporal anual de la vegetación en la zona, asociada a tipos de vegetación, mientras que la segunda identifica su régimen térmico. Eso es necesario porque diferentes tipos de vegetación pueden tener los mismos 2 primeros momentos estadísticos (promedio y desviación estándar), y con una evolución temporal muy diferente. Por ejemplo, el valor máximo del NDVI en zonas áridas se obtiene entre uno a tres meses antes que el de zonas templadas. Si se omite considerar el régimen térmico, estos dos diferentes tipos de vegetación se podrían mezclar en la misma clase, la cual impediría mostrar una evolución temporal coherente: solo el comportamiento de la clase dominante sería visible.

2.4.1. Clasificación según la vegetación

Esta clasificación esta elaborada usando el método descrito en Morales *et al.* (2004). En una primera etapa, este método necesita calcular un año promedio de valores NDVI. Esto se hizo promediando primero todas las imágenes adquiridas durante el mes de Enero de cada año, con el fin de obtener una imagen promedio de Enero, y luego se repitió esta operación con todos los meses del año. A partir de

este año promedio, computamos el valor promedio y el coeficiente de variación del NDVI. Calculamos el coeficiente de variación como sigue:

$$C_v = 100 \times \frac{\sigma}{\bar{n}} \quad (15)$$

siendo \bar{n} el valor promedio de NDVI, y σ es la desviación estándar del NDVI durante el año promedio.

Una vez obtenidas estos dos valores para cada píxel de la zona de estudio, en una clasificación por umbrales de media y coeficiente de variación, podemos distinguir nueve clases, dependiendo del valor de ambos parámetros. Los valores de NDVI están divididos de la manera siguiente:

- $NDVI \leq 0.2$: suelo desnudo,
- $0.2 < NDVI \leq 0.5$: mezcla de suelo desnudo y de vegetación,
- $NDVI > 0.5$: solo vegetación,

Mientras que se divide al coeficiente de variación como sigue:

- $C_v \leq 3\%$: variabilidad baja,
- $3\% < C_v \leq 6\%$: variabilidad media,
- $C_v > 6\%$: variabilidad alta.

2.4.2. Clasificación según el régimen térmico.

Esta segunda clasificación se elabora a partir del dato de temperatura del aire a 2 metros de altura, obtenida del Reanalysis por la Universidad de Delaware (USA). Usamos este dato para calcular, para un año promedio, los días-grados (Dg), como introducido por Réaumur (1735): de todos los días del año promedio se seleccionan los que tuvieron una temperatura del aire promedio superior o igual a 10°C (T), que se suman para obtener los días-grados, de acuerdo a la ecuación:

$$Dg = \sum (T - 10^\circ C) \quad (16)$$

Obtenemos así un mapa de la zona de estudio, que hemos dividido en cinco zonas, según el régimen térmico, como definido por Thornthwaite (1948):

- $Dg < 500$: microtermal,
- $500 \leq Dg < 1000$: infratermal,
- $1000 \leq Dg < 3000$: mesotermal,
- $3000 \leq Dg < 5000$: supratermal,
- $Dg > 5000$: macrotermal.

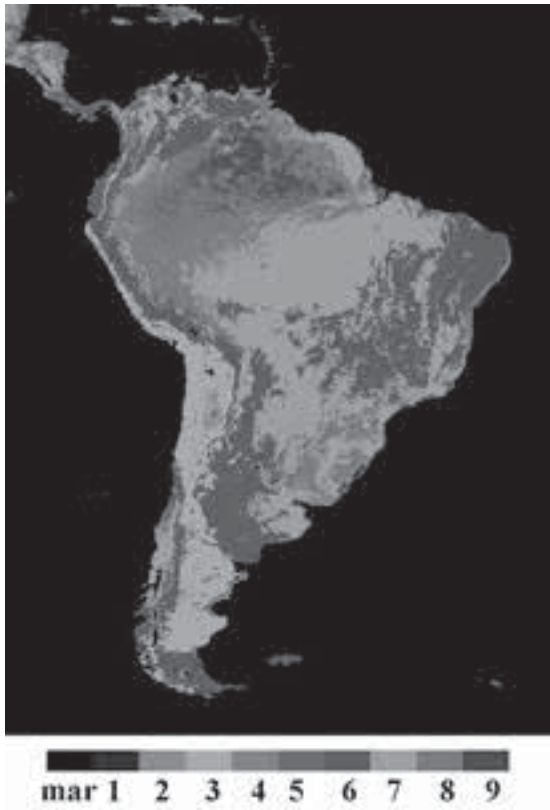


Figura 1. Clasificación según la vegetación. Las clases las más bajas representan las zonas con muy poca vegetación, mientras que las más altas representan vegetación más densa.

2.4.3. Clasificación final

A partir de las nueve clases obtenidas de la primera clasificación, y, de las cinco clases de la segunda, elaboramos la clasificación final mediante cruzamiento de tablas. De las 45 posibles clases se obtienen 41 clases, pero algunas contienen muy pocos píxeles, así que todas las clases con menos de mil píxeles son redistribuidas a las clases las más cercanas geográficamente. Una vez realizada esta operación, pasamos un filtro de moda (o de mayoría) sobre la imagen clasificada, lo que deja 14 diferentes clases.

A partir de esta clasificación, nos proponemos estudiar la evolución de la vegetación, primero durante un año promedio, lo que permitirá observar los comportamientos anuales para las distintas clases. En un segundo tiempo, estudiaremos la evolución a largo plazo durante los 20 años de datos PAL. Esos dos estudios serán llevados a cabo promediando los valores de un parámetro dado dentro de una clase dada.

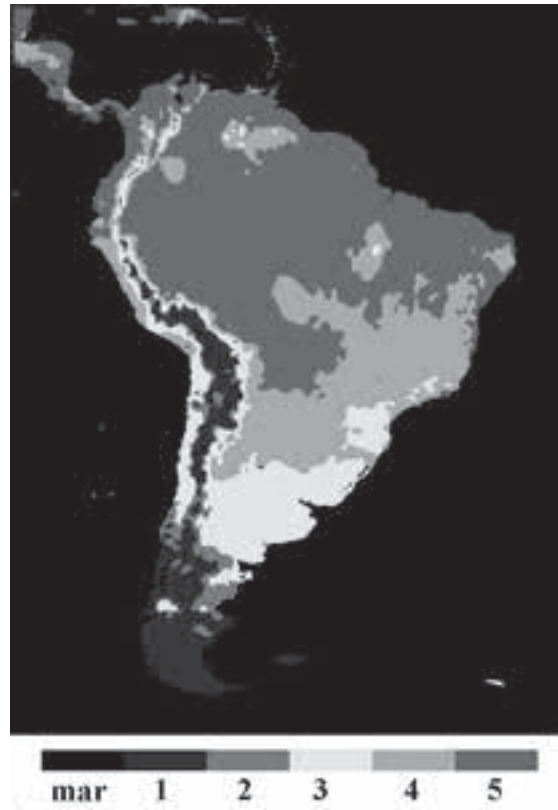


Figura 2. Clasificación según el régimen térmico. Los regímenes térmicos son los siguientes: 1 - microtermal; 2 - infra-termal; 3 - mesotermal; 4 - supratermal; 5 - macrotermal.

RESULTADOS

En esta parte presentamos las clasificaciones obtenidas por los métodos expuestos precedentemente, así como las evoluciones de NDVI y LST por clase, a nivel anual y a largo plazo.

3.1. Clasificaciones

3.1.1. Clasificación según el NDVI

En la figura 1 mostramos la clasificación según el NDVI. En esta figura, los valores promedios de NDVI bajos (clases 1 a 3) se diferencian de los valores de NDVI medios (clases 4 a 6) y de los valores de NDVI altos (clases 7 a 9). Los valores de coeficiente de variación bajo corresponden a las clases 1, 4 (casi inexistente) y 9. Los valores medios del coeficiente de variación corresponden a las clases 2, 5 y 8, mientras que los valores altos se encuentran en las clases 3, 6 y 7. Las clases 1 y 2

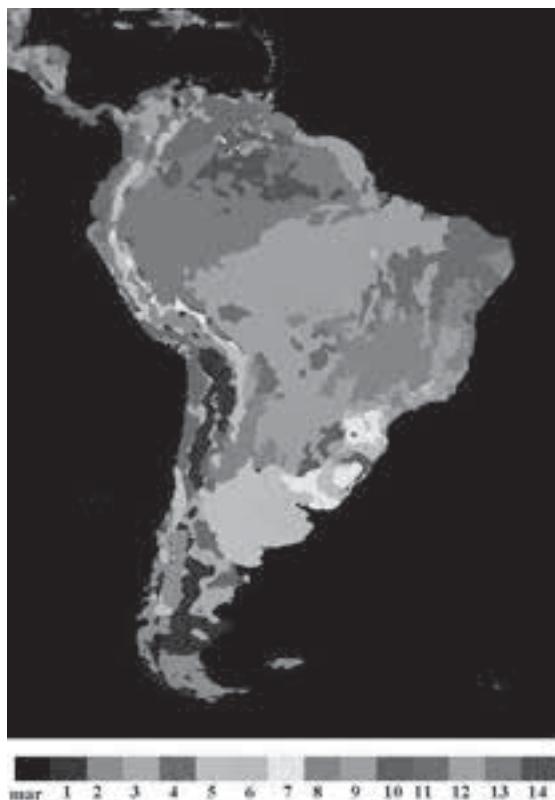


Figura 3. Clasificación final. Las 3 primeras clases son asociadas con zonas montañosas, la clase número 4 describe zonas áridas y semiáridas, mientras que las clases 11 a 14 describen bosques tropicales.

son zonas montañosas, mientras que la clase 3 incluye las zonas áridas y semiáridas. Las clases 4, 5 y 6 son compuestas de pastos y zonas de cultivos. La clase 7 es una mezcla de cultivos y bosques, mientras que las clases 8 y 9 son principalmente bosques tropicales (ver clasificación IGBP, por ejemplo).

3.1.2. Clasificación según el régimen térmico

En la figura 2 mostramos la clasificación según el régimen térmico. En esta clasificación, las clases las más frías son las clases 1 y 2, correspondiendo a las zonas montañosas y al sur del continente. La clase 3 corresponde a las zonas áridas y semiáridas, mientras que las clases 4 y 5, más calidas, están situadas alrededor del ecuador, y incluyen principalmente bosque tropical y cultivos.

3.1.3. Clasificación final

En la figura 3 presentamos la clasificación final. Las 3 primeras clases están asociadas con zonas

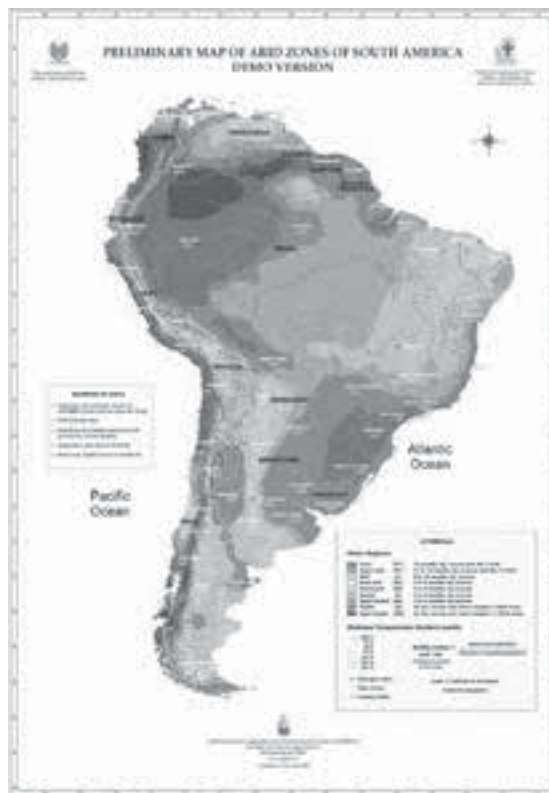


Figura 4. Mapa de zonas áridas adaptada del proyecto CAZALAC. Ver texto para más detalles.

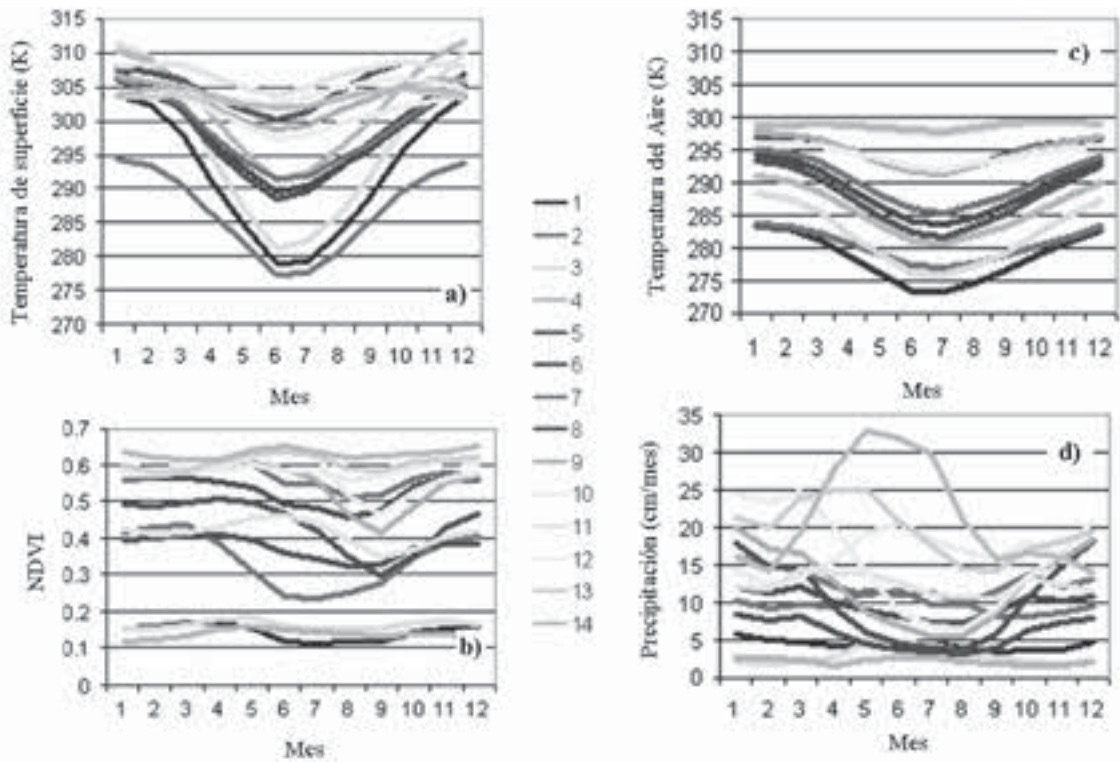
montañosas, la clase número 4 concierne únicamente a las zonas áridas y semiáridas, mientras que las clases 11 a 14 corresponden a bosques tropicales.

Para validar esta clasificación, la hemos comparado con una clasificación según los regímenes de humedad, elaborada por el CAZALAC (Centro del Agua para Zonas Áridas y semiáridas de Latinoamérica y el Caribe) de Chile (Lobo *et al.*, 2005). La elección de esta clasificación (ver figura 4) se debe a la escasez de clasificaciones parecidas al trabajo que presentamos aquí. Una simple comparación visual permite realizar el grado de similitud entre estas dos clasificaciones.

3.2. Evolución

3.2.1. Evolución estacional

Para estudiar la evolución de la vegetación en América del Sur durante las diferentes estaciones del año, calculamos un año promedio para cada



*Figura 5. Evoluciones durante un año (promedio de los 20 años de datos) de a) Temperatura de Superficie; b) NDVI; c) Temperatura del Aire a 2m; d) Precipitación. Los dos primeros datos provienen de la base de datos PAL, mientras que los dos últimos provienen de la base de datos Reanalysis

parámetro estimado. Estos fueron calculados como se ha explicado anteriormente en el caso del NDVI.

Mostramos respectivamente en las figuras 5.a) y 5.b) las evoluciones anuales de temperatura de superficie y NDVI. Para asegurarnos que estas evoluciones son coherentes, mostraremos las evoluciones anuales de la temperatura del aire a 2m y de la precipitación respectivamente en las figuras 5.c) y 5.d). Estas dos últimas series son extraídas de la base de datos meteorológicos Reanalysis. Comparando las figuras 5.a) y 5.c), uno puede observar que las evoluciones tienen unas tendencias similares, con generalmente una menor amplitud térmica para la temperatura del aire. Se puede también observar que la diferencia entre ambas temperaturas varía con las clases, siendo las clases que corresponden a una vegetación más densa las que presentan una diferencia menor de temperatura. Para facilitar la comparación, la tabla 1 presenta los valores de amplitud de LST y temperatura del aire (TA), la diferencia entre estas dos amplitudes, así como su inter-correlación. Las correlaciones entre LST y TA son altas para las clases 1 a 10, confirman-

do el análisis visual de las evoluciones. Las clases 11 a 14, siendo las que ven una temperatura casi constante a lo largo del año (amplitudes de temperatura del orden de 5 K o menos), tienen una correlación menor.

clase	Amplitud LST (K)	Amplitud TA (K)	Diferencia amplitud entre LST y TA (K)	Correlación (LST y TA)
1	25.52	10.47	15.05	0.92
2	17.33	6.78	10.55	0.82
3	30.07	11.87	18.2	0.90
4	21.86	10.68	11.18	0.95
5	19.35	11.18	8.17	0.95
6	17.04	11.41	5.63	0.87
7	13.91	9.94	3.97	0.88
8	7.23	5.15	2.08	0.83
9	8.97	6.22	2.75	0.94
10	4.38	1.23	3.15	0.97
11	5.43	3.68	1.75	0.68
12	4.21	1.37	2.84	0.39
13	2.85	2.08	0.77	0.47
14	4.41	2.42	1.99	0.70

Tabla 1. Comparación entre las evoluciones anuales de LST y temperatura del aire (TA)

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

Las figuras 5.b) y 5.d) muestran también unas evoluciones similares, pero variando las amplitudes para cada clase. La tabla 2 muestra las amplitudes anuales de NDVI y precipitación, así que su coeficiente de correlación. La única clase presentando una correlación alta es la clase 6.

Clase	Amplitud NDVI	Amplitud PP (cm/mes)	Correlación (NDVI y PP)
1	0.03	2.25	0.30
2	0.11	3.33	0.71
3	0.03	3.19	0.61
4	0.03	1.46	0.05
5	0.08	5.50	0.67
6	0.11	4.38	0.91
7	0.09	6.65	0.36
8	0.19	14.78	0.38
9	0.19	15.04	0.31
10	0.05	6.64	-0.06
11	0.10	4.51	0.27
12	0.16	18.74	0.18
13	0.05	10.73	0.31
14	0.04	20.48	0.22

Tabla 2. Comparación entre las evoluciones anuales de NDVI y precipitación (PP)

3.2.2. Evolución a largo plazo

Las evoluciones a largo plazo de la temperatura de superficie terrestre y del NDVI fueron computadas para todo el conjunto de datos de la base PAL. Las figuras 6.a) y 6.b) muestran estos resultados. En ambas gráficas las líneas verticales negras señalan las fechas de cambio de satélite (ver tabla 3), y la línea vertical roja la erupción del Monte Pinatubo (Junio del 1991).

Número de satélite	Fechas de actividad de los satélites	Número de imagen
NOAA - 7	11/1981 - 01/1985	0 - 127
NOAA - 9	02/1985 - 10/1988	128 - 262
NOAA - II	04/1989 - 09/1994	263 - 473
NOAA - 14	01/1995 - 07/2001	485 - 721
NOAA - 16	09/2000 →	689 - 727

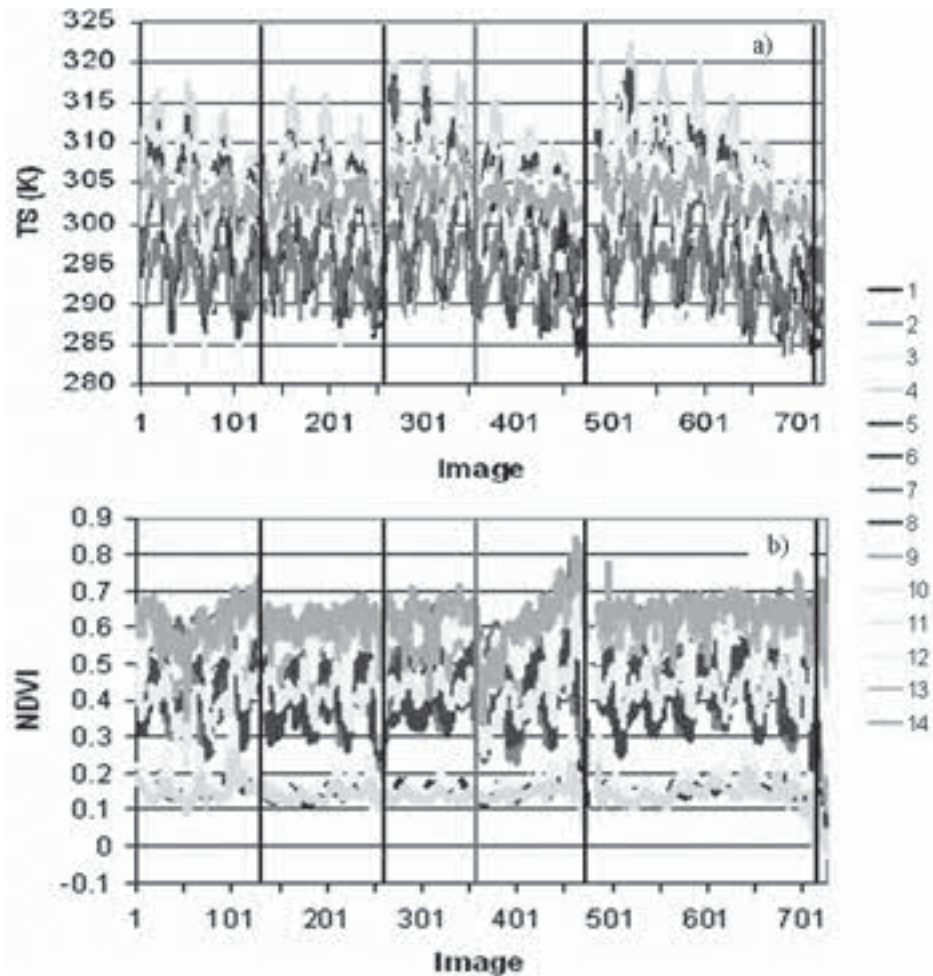
Tabla 3. Fechas de actividad de los satélites NOAA, y números de imágenes correspondientes

Por lo que concierne a la evolución a largo plazo de la temperatura de la superficie, es evidente que los cambios de satélites afectan a los datos: cada cambio de satélite es acompañado por un incremento en la temperatura, seguido por una disminución progresiva de la temperatura de superficie durante el periodo de actividad del satélite. Price (1991) evidenció este efecto, llamado deriva de órbita, que impide la utilización de los datos térmicos del AVHRR para comparaciones interanuales.

Por lo que se refiere a la evolución a largo plazo del NDVI, el efecto de la deriva de órbita no es tan evidente, como demostraron Kaufmann *et al.* (2000). No obstante, la erupción del Monte Pinatubo en Junio del 1991 afectó a la adquisición de los datos, por la gran cantidad de aerosoles emitidos (ver Gleason *et al.*, 2002; Lucht *et al.*, 2002). También se puede observar a partir del 2000 una disminución del NDVI independientemente de la clase, lo que podría explicarse por un problema con el sensor AVHRR a bordo del NOAA-16.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

En el presente trabajo se ha desarrollado una metodología para el estudio a largo plazo de la vegetación en Sudamérica, a través de la clasificación de la zona a partir de datos satelitales y meteorológicos. Por la falta de fiabilidad de los datos de temperatura de superficie, la clasificación no pudo ser elaborada solo a partir de los datos, como sería conveniente para la observación de los cambios padecidos. La clasificación construida está basada en la evolución anual del NDVI (obtenido del PAL) y de la temperatura del aire a 2 metros de altura (obtenida del Reanalysis). Esta clasificación es comparable a clasificaciones climáticas, como la del CAZALAC (basada en el régimen hídrico). Esta clasificación permite sacar tendencias anuales y a largo plazo conformes con resultados publicados anteriormente, lo que confirma la validez de este trabajo. No obstante, la base de datos PAL sufre de la deriva de órbita de los satélites NOAA, lo que necesita una corrección adecuada. Esta corrección y a ha sido llevada a cabo en el caso del NDVI (base de datos GIMMS), pero sigue por hacer en el térmico. Este tipo de corrección no es fácil, tal y como puede verse en los trabajos de Jin & Treadon (2003) y Pinheiro *et al.* (2004). En la actualidad los autores están trabajando en el desarrollo de un método operativo que permita evaluar esta corrección.



*Figura 6. Evoluciones a largo plazo de a) Temperatura de Superficie; b) NDVI. Las líneas verticales negras muestran las fechas de cambio de satélites (ver tabla 1), mientras que la línea vertical roja muestra la erupción del Monte Pinatubo (Junio del 1991).

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la AECI (proyecto A/229/03) del Ministerio de Asuntos Exteriores, a la Unión Europea (proyecto EAGLE: SST3-CT-2003-502057), así como el Ministerio de Ciencia y Tecnología (proyecto REN2001-3105/CLI) por la ayuda económica prestada.

REFERENCIAS

BOGAERT, J., ZHOU, L., TUCKER, C. J., MYNENI, R. B. & CEULEMANS, R., 2002. Evidence for a persistent and extensive greening trend in Eurasia inferred from satellite vegetation

index data. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107(D11), 10.1029/2001JD001075.

CARLSON, T. N. & RIPLEY, D. A., 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62 (3): 241-252.

GLEASON, A., PRINCE, S., GOETZ, S. & SMALL, J., 2002. Effects of orbital drift on land surface temperature measured by AVHRR thermal sensors, *Remote Sensing of Environment*, 2002, vol. 79, 147-165.

GORDON, H. R., BROWN, J. W. & EVANS, R. H., 1988. Exact Rayleigh scattering calculations for use with the Nimbus- 7 coastal zone color scanner. *Applied Optics*, 27:2111-2122.

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

- HOLBEN, B. N., 1986. Characteristics of maximum values composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, Vol. 7, 1417-1434.
- JAMES, M. E. & KALLURI, S. N. V., 1994. The AVHRR Land data set: an improved coarse resolution data set for terrestrial monitoring, *International Journal of Remote Sensing*, 1994, vol. 15, 3347-3363.
- JIN, M. & TREADON, R. E., 2003. Correcting the orbit drift on AVHRR land surface skin temperature measurements, *International Journal of Remote Sensing*, 2003, vol. 24, no. 22, 4543-4558.
- KAUFMANN, R., ZHOU, L., KNYAZIKHIN, Y., SHABANOV, N., MYNENI, R. & TUCKER, C., 2000. Effect of orbital drift and sensor changes on the time series of AVHRR vegetation index data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 38, no. 6, 2584-2597.
- KISTLER, R., KALNAY, E., COLLINS, W., SAHA, S., WHITE, G., WOOLLEN, J., CHILLIAH, M., EBISUZAKI, W., KANAMITSU, M., KOUSKY, V., VAN DEN DOOL, H., JENNE, R. & FIORINO, M., 2001. The NCEP-NCAR 50-year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82, 247-267.
- LOBO, L. D., GABRIELS, D., OVALLES, F.V., SANTIBAÑEZ, F., MOYANO, M.C., AGUILERA, R., PIZARRO, R., SANGÜESA, C. & URRÁ, N., 2005. *Guía metodológica para la elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas de América Latina y el Caribe*, UNESCO-PHI Program (website: http://www.cazalac.org/mapa_alc_guia.html).
- LUCHT, W., PRENTICE, I. C., MYNENI, R. B., SITCH, S., FRIEDLINGSTEIN, P., CRAMER, W., BOUSQUET, P., BUERMANN, W. & SMITH, B., 2002. Climatic Control of the high-latitude vegetation greening trend and Pinatubo effect. *Science*, 296: 1687-1689.
- MCPETERS, R. D., et al., 1993. *Nimbus-7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide*. NASA Reference Publication 1323.
- MORALES, L., CASTELLARO, G., SOBRINO, J. A. & EL KHARRAZ, J., 2004. Land cover dynamic monitoring in the region of Coquimbo (Chile) by the analysis of multitemporal NOAA-AVHRR NDVI images. *ISPRS Conference*, Commission VI, 12-23 July 2004, Istanbul, Turquia.
- MYNENI, R. B., KEELING, C. D., TUCKER, C. J., ASRAR, G. & NEMANI, R. R., 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, Vol. 386, 17 april 1997.
- PINHEIRO, A., PRIVETTE, J., MAHONEY, R. & TUCKER, C., 2004. Directional effects in a daily AVHRR land surface temperature dataset over Africa, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 42, no. 9, 1941-1954.
- PRICE, J. C., 1991. Timing of NOAA afternoon passes. *International Journal of Remote Sensing*, 12, 193-198.
- RÉAUMUR, R. A. F. DE, 1735. Observations du thermomètre. *Acad. Roy. des xi. des Pays-Bas Mem.*, pp. 737-754.
- SAUNDERS, R. W. & KRIEBEL, K. T., 1988. An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 9, 123-150.
- SOBRINO, J. A. & RAISSOUNI, N., 2000. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: application to Morocco. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 353-363.
- SOBRINO, J. A., RAISSOUNI, N., SIMARRO, J., NERRY, F. & PETITCOLIN, F., 1999. Atmospheric water vapor content over land surfaces derived from the AVHRR data: application to the Iberian Peninsula, *IEEE, Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37, 1425-1434.
- THORNTON, C. W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38, 55-94.
- TUCKER, C. J., SLAYBACK, D. A., PINZON, J. E., LOS, S. O., MYNENI, R. B. & TAYLOR, M.G., 2001. Higher northern latitude NDVI and growing season trends from 1982 to 1999. *International Journal of Biometeorology*, 45:184-190.
- ULIVIERI, C., CASTRONUOVO, M. M., FRANCONI, R. & CARDILLO, A., 1994. A split window algorithm for estimating land surface temperature from satellites, *Advances in Space Research*, 14 (13), 59-65.
- ZHOU, L., TUCKER, C. J., KAUFMANN, R. K., SLAYBACK, D., SHABANOV, N. V. & MYNENI, R. B., 2001. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999, *Journal of Geophysical Research*, 106(D17):20069-20083.
- ZHOU, L., KAUFMANN, R. K., TIAN, Y., MYNENI, R. B. & TUCKER, C. J., 2003. Relation between interannual variations in satellite measures of vegetation greenness and climate between 1982 and 1999. *Journal of Geophysical Research*, 108 (D1), doi: 10.1029/2002JD002510.