

## UNA APROXIMACION SIMPLE PARA ESTIMAR PRECIPITACION CON DATOS DE RADIACION DE ONDA LARGA SALIENTE

*Carlos Zotelo<sup>1</sup>, Marcela González<sup>2</sup>, Vicente Barros<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Depto de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO).

<sup>2</sup>Centro de Investigación del Mar y la Atmósfera (CIMA).

<sup>1,2</sup>Fac. de Ciencias Exactas y Naturales. Unive. de Buenos Aires. Intendente Guiraldes s/n - Ciudad Universitaria - Pabellón II - 2do Piso. (C1428EHA) Ciudad Autónoma de Buenos Aires

zotelo@at.fcen.uba.ar, gonzalez@cima.fcen.uba.ar, barros@cima.fcen.uba.ar

### RESUMEN

En el presente trabajo, se estudió la relación existente entre los valores de anomalía mensual de precipitación y la radiación de onda larga saliente terrestre (OLR), explorando la posibilidad de generar un modelo sencillo para la estimación de lluvia. El análisis se restringió a la región limitada por los paralelos 21.25°S - 31.25°S y los meridianos 48.75°W - 58.75°W, en el período 1975-2000.

Debido a las características locales y a los distintos regímenes de lluvia que se producen en diferentes épocas del año, se crearon y caracterizaron diversos índices basados en OLR, con el fin de determinar el mejor estimador de las anomalías mensuales de precipitación. Se obtuvieron matrices mensuales y estacionales de correlación entre dichos índices y las anomalías de precipitación para determinar patrones de variación interanual e interestacional. Se establecieron métodos de selección de los índices predictores así como una función de ajuste del tipo lineal y no lineal para cada mes del año.

En general, se observa que la presencia del evento Niño actúa como intensificador de la relación entre los índices y las anomalías estacionales de precipitación durante todo el año. En particular, esto se evidencia más en primavera y otoño. Por su parte, la presencia del evento Niña se presenta como intensificador de dicha relación únicamente en primavera.

Se concluye que si bien el valor mensual de OLR es una herramienta útil para determinar zonas con actividad convectiva, resulta no ser siempre el mejor estimador directo de la lluvia. Existen, no obstante, índices derivados de la OLR como P240, que resultan ser más apropiados. De las funciones predictoras propuestas, el ajuste no lineal resulta más adecuado en el 67% de los casos. Si se tiene en cuenta que en marzo y en abril la elección de una expresión lineal se fundamenta únicamente en criterios de simplicidad, eleva su relevancia al 89%. Sin embargo, de los métodos de selección aplicados, se observa que la precipitación en primavera no puede ser representada por ninguno de los índices propuestos.

**Palaabras claves:** OLR, Sensores Remotos, Datos Satelitales, Precipitación, Estimación de Lluvia

### ABSTRACT

In the present work, the existing relation between the values of monthly precipitation anomaly and the radiation of terrestrial salient long wave (OLR) was studied, exploring the possibility of generating a simple model for the rain estimation. The analysis was restricted to the region limited by the parallels 21.25°S - 31.25°S and the meridians 48.75°W - 58.75°W, in period 1975-2000.

Due to the local characteristics and to the different rain regimes that take place at different times from the year, diverse indices based on OLR were created and characterized, with the purpose of determining the best estimator of the monthly precipitation anomalies. Monthly and seasonal matrices of correlation between these indices were obtained and the precipitation anomalies to determine patterns of interannual

and interseasonal variation. Methods of selection of the predicting indices were settled down as well as a function of adjustment of the type linear and nonlinear for every month of the year.

In general, it is observed that the presence of El Niño event throughout acts like intensifier of the relation between the indices and the seasonal anomalies of precipitation the year. In particular, this is more evident in spring and autumn. On the other hand, the presence of La Niña event appears only like intensifier of this relation in spring.

One concludes that although the monthly value of OLR is a useful tool to determine zones with convective activity, it always shows not to be the best direct estimator of rain. Another indices derived from the OLR like P240 exist, however, that marks out to be more appropriate. From the different propose predicting functions, the adjustment nonlinear is more suitable in 67% of the cases. Still more, if one considers that on March and April the election of a linear expression is based only on simplicity criteria, elevating its relevance to 89%. Nevertheless of the applied methods of selection, it is observed that the precipitation in spring cannot be represented by any of the proposed indices.

**Keywords:** OLR, Sensores Remotos, Datos Satelitales, Precipitación, Estimación de Lluvia

## INTRODUCCION

La alta inhomogeneidad espacial y temporal de la lluvia y la baja densidad de estaciones pluviométricas han provocado en la comunidad meteorológica, una intensa búsqueda de métodos que permitan, al menos en áreas desprovistas de mediciones, obtener aproximaciones de la cantidad de precipitación caída. En este sentido, en los últimos 30 años, se han desarrollado un gran número de técnicas para estimar indirectamente la precipitación a partir de datos satelitales, empleando tanto el espectro visible como el infrarrojo. En general, estos métodos se basan en el hecho de que nubes con gran actividad convectiva, producen mayor intensidad de lluvia y que en las regiones con precipitación, ésta tiende a estar correlacionada con dichos datos satelitales (Kilonsky y Ramage, 1976). Otras técnicas relacionaron datos satelitales con actividad convectiva tropical (Gruber y Winston, 1978) o con valores de precipitación, ya sea en zonas a mar abierto o en regiones continentales.

Un producto derivado de mediciones satelitales es la radiación de onda larga saliente (OLR). Es una medida de la cantidad de radiación emitida por la Tierra que logra

escapar de la atmósfera hacia el espacio exterior. Obviamente este valor está directamente relacionado con el espesor de la nubosidad presente, de forma tal que la convección intensa se identifica con valores de OLR muy bajos. De esta manera, es sabido que OLR inferiores a  $240 \text{ W/m}^2$  están asociados a fenómenos convectivos (Kousky, 1988). Muchos métodos de estimación de la precipitación se basan en este criterio. Arkin y Ardanuy (1989) compararon distintos métodos que relacionaban indirectamente estas variables y obtuvieron una buena correspondencia entre la nubosidad y las mediciones de OLR, sobre todo en zonas tropicales donde dominan los procesos convectivos.

Muchos esfuerzos se han hecho para cuantificar esta correspondencia pero han arrojado resultados dispares. Lau y Chan (1983), por ejemplo, derivaron una relación lineal entre la precipitación y el número de días al mes en los que el promedio diario de OLR es inferior a  $240 \text{ W/m}^2$  usando datos mensuales en celdas de  $2.5^\circ$  de resolución en el Pacífico tropical. Kilonsky y Ramage (1976) establecieron una relación entre la precipitación, la frecuencia y el tipo de nubosidad en el Pacífico. Por su parte en Sudamérica,

los trabajos realizados en este sentido se basan principalmente en el análisis de la dinámica de la convección y los patrones de circulación asociados como el de Liebmann *et al.*, (2004). En Argentina, es escasa la bibliografía acerca del estudio de la relación entre precipitación y datos satelitales. Entre los trabajos realizados se pueden mencionar el de Almeida y Barros (1998), que estudiaron la relación entre la OLR de la subcuenca del río Paraguay y el caudal en Puerto Bermejo. González y Velasco (1992) utilizaron imágenes provenientes del satélite GOES y del NOAA (González y Velasco, 1995 a y b) para ajustar métodos de estimación de precipitación en Argentina. Barrera (2005, 2006) utilizó el método del hidro-estimador desarrollado por Scofield *et al.*, (2003) en Argentina, obteniendo resultados alentadores. El mismo utiliza imágenes infrarrojas para a través de la temperatura del tope de nubes inferir la precipitación convectiva y determinar también la acontecida a partir de un manto de nimboestratus. Otros trabajos como Vila *et al.*, (2001) han aplicado métodos de estimación al caso específico de tormentas severas. Por su parte, Kousky (1988) utilizó datos de OLR para determinar el comienzo y el final climatológico de la convección monzónica en Brasil Central y González *et al.*, (2002) demostraron que durante el otoño y la primavera austral, el valor de OLR en la selva brasilera es una variable relacionada con la lluvia en la región subtropical de Argentina al este de Los Andes, mostrando una clara interconexión entre procesos tropicales y extratropicales.

El presente trabajo explora la búsqueda del tipo de relación cuantitativa existente entre OLR y anomalía mensual de precipitación en el noreste de Argentina y sur de Brasil, área de predominancia de actividad convectiva, aunque afectada por pasaje de sistemas frontales. El objetivo principal es el desarrollo de un método capaz de estimar valores de

anomalías mensuales de precipitación en la región de estudio, generando y utilizando distintos índices según la época del año. Para ello se propondrán diferentes estimadores y se realizará una caracterización espacial y temporal de los mismos. Se establecerá un criterio de selección apropiado de los distintos índices y para diferentes áreas y épocas del año se elegirá el mejor predictor con el fin de encontrar una expresión simple que permita la estimación de la lluvia caída. En la sección 2 se detallan los datos utilizados para la realización del trabajo y la metodología empleada, mientras que en la sección 3 se enumeran los resultados más significativos.

## **METODOLOGIA Y DATOS EMPLEADOS**

Para realizar este trabajo se utilizaron datos diarios de OLR provenientes del Climate Diagnostic Center (Liebmann y Smith, 1996) con una resolución espacial de 2.5° de latitud x 2.5° de longitud. Estos datos son promedios derivados de dos pasadas diarias del satélite NOAA (diaria y nocturna) con el fin de filtrar el ciclo diario de la precipitación. Se utilizaron datos pluviométricos diarios correspondientes a 411 estaciones provenientes de diversas fuentes: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de Argentina (INTA), Servicio Meteorológico Nacional de Argentina (SMN), Programa para el Estudio de la Variabilidad Climática Regional, su Predicción e Impactos en el Área del MERCOSUR (PROSUR), de Evaluación de Recursos S.A. (EVARSA), Red Climática Histórica Global (GHCN) (Cort Willmott y Kenji Mansura, 2000), de la Dirección Nacional de Meteorología de Uruguay (DNM) y de la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande (CTM). Los datos han sido consistidos temporal y espacialmente y se han depurado con el fin de construir una base homogénea y confiable. El área considerada está altamente influenciada, por

los sistemas convectivos y se encuentra comprendida por los paralelos 21.25°S - 31.25°S y los meridianos 48.75°W - 58.75°W, abarcando el sur de Brasil, sudeste de Paraguay, noreste de Argentina y noroeste de Uruguay. Temporalmente, el análisis se restringió al período 1975-1991 dado que en él se encontró la mayor cantidad de estaciones con registro completo. Para verificar la metodología, se utilizaron las observaciones correspondientes al período 1992-2001.

Para la detección de estos datos espúreos, se estableció como criterio primario de aceptación un umbral máximo de 3 meses con ausencia de datos en al menos 1 día al mes. De esta manera, si el dato del pluviómetro correspondiente al día  $i$  del mes  $j$  es faltante, la precipitación acumulada del mes  $j$  se considera ausente, luego, si la cantidad de meses con datos faltantes es superior a 3, el año en cuestión se asume como ausente. Como criterio secundario se empleó la precipitación acumulada anualmente, comparando a cada estación  $i$  con sus vecinas  $j$  más próximas se entiende por estación vecina  $j$  a aquella cuya interdistancia  $R$  no supera los 141 km, es decir,  $1^\circ$  de latitud  $\times$   $1^\circ$  de longitud. De este modo, no se consideraron valaderos los datos provenientes de una localidad, si la lluvia acumulada ppi en ésta, difería de la del entorno ppj en al menos un 20%. En ese caso, se asumió faltante el dato ppi para todo el año.

La región de estudio fue dividida en 16 parcelas o sectores denominadas boxes, conformando un reticulado de  $2.5^\circ$  de latitud  $\times$   $2.5^\circ$  de longitud concordantes con el grilla del registro de datos de OLR (Fig. 1) De esta manera, cada uno de los boxes tiene asociado una serie de OLR mensual para el período 1975-2001.

Dado que los valores de OLR inferiores a  $240 \text{ W/m}^2$  son indicativos de actividad convectiva (Kousky, 1988), se propusieron umbrales de trabajo para dicha variable dados por los valores: 220, 225, 230, 235 y  $240 \text{ W/m}^2$ .

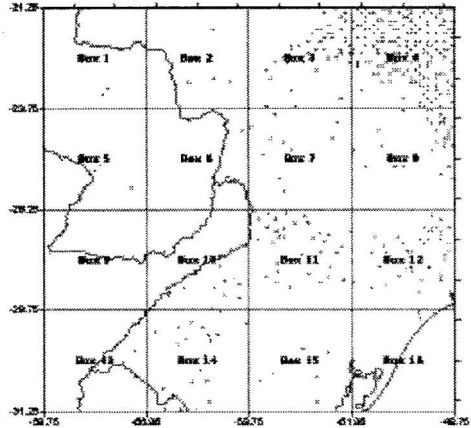


Figura 1. Denominación de los distintos boxes y distribución espacial de las distintas estaciones pluviométricas utilizadas

$\text{m}^2$ . De esta manera se definieron los siguientes índices para cada box y mes del año:

a) El número de días en el mes en los cuales el valor de OLR diario es inferior a  $220 \text{ W/m}^2$  ( $N_{220}$ ). Este índice fue definido con el fin de cuantificar temporalmente la convección profunda, dado que seguramente un mayor número de días en esta situación estarán relacionados con mayores valores de lluvia caída. Siendo  $M$ , la cantidad de días del mes en cuestión, se obtiene:

$$N_j = \begin{cases} 0 & \overline{OLR}_{\text{diario}} > 220 \text{ W/m}^2 \\ 1 & \overline{OLR}_{\text{diario}} \leq 220 \text{ W/m}^2 \end{cases} \quad N_{220} = \sum_{j=1}^M N_j$$

b) El promedio mensual de las diferencias diarias entre el umbral  $220 \text{ W/m}^2$  y el valor medio diario de OLR observado ( $D_{220}$ ). El objetivo de esta definición es cuantificar el nivel de convección, identificando si la misma es más o menos profunda.

Evidentemente cuanto más profunda sea la convección, cabe esperar mayor cantidad de precipitación.

$$\overline{D}_{220} = \sum_{i=1}^M (220 \text{ W/m}^2 - \overline{OLR}_i)$$

c) El producto entre ambos índices anteriores ( $P_{220}$ ), de forma de cuantificar simultáneamente la profundidad de la convección y el tiempo que el evento estuvo presente:

$$P_{220} = N_{220} \cdot D_{220}$$

Análogamente se estimaron para los restantes umbrales de OLR los índices N225, N230, N235, N240, D225, D230, D235, D240, P225, P230, P235 y P240, respectivamente. Obviamente estos indicadores no son independientes unos de otros, sin embargo, debido a características locales y a los distintos regímenes de lluvia que se producen en diferentes épocas del año, es probable que alguno de ellos sea un mejor estimador de la precipitación que otro. Todos los índices definidos anteriormente además del valor medio mensual de OLR (OLR, en adelante) fueron utilizados como posibles estimadores de la anomalía mensual de lluvia a través de una serie de funciones sencillas.

## RESULTADOS

### **Análisis temporal y espacial de índices derivados de valores de OLR.**

Para analizar el comportamiento espacial y temporal de cada índice respecto de la anomalía mensual de precipitación en cada box, se calculó la correlación entre estas variables para cada mes del año, como se detalla, para el caso particular de enero, en la Tabla 1. Las correlaciones significativas con el 95% de confianza se indican en negrita. Se observa claramente que para este mes, los estimadores OLR,  $N_j$  y  $P_j$  (donde  $j$  representa cada uno de los umbrales definidos), muestran una alta correlación significativa prácticamente en todos los boxes. Esto se ajusta a lo esperable, la gran actividad convectiva en esta época del año es muy fuerte y es la causante principal de la lluvia en la región. Enero es el mes que

mejor correlación presenta entre las variables en cuestión, con una mediana máxima de 0.82 para P240, mientras que Septiembre es el otro extremo con 0.56 también para P240. Más aún, en todos los meses la máxima mediana espacial estuvo asociada a P235, P240 u OLR (Tablas no mostradas), constituyendo un primer indicio para la selección deseada. Por su parte, los índices  $D_j$  no presentan correlación significativa para ningún box, en ningún mes del año, razón por la cual no se detallan en las siguientes tablas. En la última línea se detalla comparativamente la mediana espacial de las correlaciones en la totalidad del área de estudio y se somborean los máximos valores. Se escogió trabajar con mediana ya que es un parámetro característico de una dada muestra de datos cualquiera. Es el valor tal que la proporción de datos menores a él, es menor o igual a  $\alpha$ , mientras que la proporción correspondiente de datos mayores a él también es menor o igual a  $\alpha$ .

Este análisis se repitió en escala estacional, definiendo los períodos de verano (diciembre-enero-febrero), otoño (marzo-abril-mayo), invierno (junio-julio-agosto) y primavera (setiembre-octubre-noviembre) para evaluar posibles características intraestacionales.

En la Tabla 2 se presenta el campo espacial de correlaciones entre los distintos índices y la anomalía mensual de precipitación para el caso verano. En concordancia con lo sucedido mensualmente, los máximos valores de las medianas de cada índice se registran para P235, P240 y OLR, patrón que se repite en las otras estaciones del año. En otoño e invierno, por ejemplo, la correlación mediana máxima espacial es de 0.7 para el índice P240. Sin embargo, en primavera, se observan valores menores, aunque los mismos índices con mayor correlación con la lluvia.

Se llevó a cabo una discriminación entre los años en que se registró la presencia de eventos Niño o Niña. Para ello se utilizó la clasificación detallada por el Climate

**Tabla 1 / Tabla 2.** Correlación entre índices y anomalías mensuales de precipitación (caso Enero / caso Verano). En negrita se presentan valores significativos al 95%. La última línea muestra la mediana de cada índice. Los valores máximos espaciales se detallan en sombreado.

Ene / Ver	N220	N225	N230	N235	N240	P220	P225	P230	P235	P240	Olr
<b>Box01</b>	0.32 / 0.21	0.27 / 0.14	0.32 / 0.15	0.37 / 0.16	0.40 / 0.14	0.41 / 0.35	0.41 / 0.34	0.41 / 0.33	0.41 / 0.32	0.41 / 0.31	-0.41 / -0.31
<b>Box02</b>	0.67 / 0.48	0.70 / 0.49	0.72 / 0.50	0.69 / 0.51	0.72 / 0.53	0.61 / 0.61	0.63 / 0.61	0.65 / 0.61	0.66 / 0.61	0.68 / 0.61	-0.73 / -0.65
<b>Box03</b>	0.84 / 0.62	0.79 / 0.57	0.77 / 0.60	0.79 / 0.60	0.78 / 0.59	0.86 / 0.68	0.87 / 0.68	0.87 / 0.69	0.87 / 0.70	0.87 / 0.70	-0.86 / -0.73
<b>Box04</b>	0.76 / 0.62	0.73 / 0.65	0.73 / 0.67	0.78 / 0.67	0.69 / 0.61	0.80 / 0.67	0.82 / 0.68	0.83 / 0.69	0.84 / 0.69	0.85 / 0.70	-0.84 / -0.73
<b>Box05</b>	0.51 / 0.23	0.54 / 0.25	0.51 / 0.22	0.50 / 0.19	0.54 / 0.27	0.46 / 0.38	0.47 / 0.37	0.48 / 0.36	0.49 / 0.35	0.50 / 0.35	-0.60 / -0.43
<b>Box06</b>	0.70 / 0.63	0.67 / 0.61	0.64 / 0.54	0.64 / 0.53	0.60 / 0.56	0.74 / 0.62	0.74 / 0.63	0.74 / 0.64	0.74 / 0.64	0.74 / 0.64	-0.61 / -0.60
<b>Box07</b>	0.76 / 0.56	0.74 / 0.55	0.71 / 0.58	0.78 / 0.61	0.75 / 0.59	0.72 / 0.65	0.73 / 0.65	0.73 / 0.65	0.74 / 0.66	0.75 / 0.66	-0.71 / -0.65
<b>Box08</b>	0.76 / 0.65	0.75 / 0.63	0.76 / 0.63	0.76 / 0.64	0.71 / 0.62	0.80 / 0.65	0.80 / 0.66	0.81 / 0.67	0.81 / 0.68	0.81 / 0.69	-0.79 / -0.68
<b>Box09</b>	0.67 / 0.58	0.63 / 0.56	0.69 / 0.58	0.60 / 0.54	0.60 / 0.52	0.74 / 0.71	0.74 / 0.70	0.74 / 0.70	0.74 / 0.70	0.73 / 0.69	-0.80 / -0.76
<b>Box10</b>	0.88 / 0.71	0.92 / 0.72	0.92 / 0.72	0.95 / 0.76	0.94 / 0.75	0.79 / 0.75	0.81 / 0.76	0.83 / 0.77	0.85 / 0.77	0.87 / 0.78	-0.91 / -0.81
<b>Box11</b>	0.77 / 0.71	0.81 / 0.71	0.81 / 0.72	0.76 / 0.69	0.73 / 0.67	0.71 / 0.73	0.73 / 0.73	0.74 / 0.74	0.75 / 0.75	0.76 / 0.75	-0.77 / -0.75
<b>Box12</b>	0.85 / 0.76	0.87 / 0.78	0.84 / 0.76	0.85 / 0.77	0.85 / 0.77	0.87 / 0.74	0.88 / 0.75	0.89 / 0.77	0.90 / 0.78	0.90 / 0.78	-0.86 / -0.80
<b>Box13</b>	0.86 / 0.72	0.84 / 0.68	0.85 / 0.73	0.87 / 0.73	0.86 / 0.70	0.78 / 0.69	0.80 / 0.71	0.81 / 0.72	0.83 / 0.74	0.84 / 0.75	-0.83 / -0.77
<b>Box14</b>	0.81 / 0.68	0.89 / 0.69	0.90 / 0.66	0.90 / 0.67	0.87 / 0.64	0.81 / 0.75	0.83 / 0.76	0.85 / 0.77	0.87 / 0.77	0.89 / 0.77	-0.88 / -0.76
<b>Box15</b>	0.82 / 0.78	0.91 / 0.83	0.88 / 0.82	0.82 / 0.76	0.90 / 0.77	0.76 / 0.76	0.78 / 0.78	0.80 / 0.80	0.82 / 0.81	0.83 / 0.81	-0.89 / -0.84
<b>Box16</b>	0.82 / 0.58	0.79 / 0.57	0.80 / 0.57	0.76 / 0.57	0.78 / 0.59	0.83 / 0.54	0.84 / 0.55	0.84 / 0.56	0.85 / 0.57	0.85 / 0.58	-0.83 / -0.10
<b>Total</b>	0.765 / 0.625	0.770 / 0.620	0.765 / 0.615	0.770 / 0.625	0.740 / 0.600	0.770 / 0.680	0.790 / 0.680	0.805 / 0.680	0.815 / 0.690	0.820 / 0.690	-0.815 / -0.710

Diagnostic Center (CDC). En la Tabla 3 se muestran las correlaciones entre los distintos índices y la anomalía mensual de precipitación para el caso verano (*DEF*) con evento Niño. En general, la presencia de dicho evento actúa como intensificador de las correlaciones estacionales durante todo el año, aunque el número de boxes con correlación significativa es menor. En particular, el aumento es más evidente en primavera y otoño, mientras en invierno y verano lo es, en menor medida.

Por su parte, en la Tabla 3, se presentan las correlaciones entre los distintos índices y la anomalía mensual de precipitación para el caso verano (*DEF*) con evento Niña. En general, se observa que la presencia de dicho evento se detecta únicamente como intensificador de las correlaciones en primavera. Sin embargo, a diferencia del caso anterior, la cantidad de boxes con correlación significativa estacional es mayor.

Tanto en el caso Niño, como en el Niña, los índices de máxima mediana espacial fueron P235, P240 y OLR.

El análisis de la evolución anual de los coeficientes de correlación obtenidos entre las anomalías de lluvia en cada box y cada uno de los posibles estimadores, mostró en términos generales, tanto en marzo como en septiembre y octubre una disminución de la respuesta de todos los índices. Los mayores valores se encuentran durante principios del invierno

(May a Jul) y en verano (Nov a Enero). A modo de ejemplo se muestran las series de coeficiente de correlación entre las anomalías de la precipitación del box 7 y los índices definidos (Fig. 2). Se observa como los índices  $P_i$  (líneas en tonalidad rojiza) en general, muestran no sólo mayor correspondencia con las anomalías mensuales de precipitación, si no un patrón más suave que los correspondientes  $N_i$  (líneas en tonalidad azul). Tal como se mencionó anteriormente y como es de esperar, OLR exhibe una alta correspondencia inversa con las anomalías de precipitación (línea verde). El resto de los boxes presentan comportamientos similares (gráficos no mostrados). En todos los casos la respuesta a la correlación fue mayor para los índices  $P_i$ . Con el fin de plantear funciones que permitan estimar a precipitación a partir de los índices definidos, se trató de identificar cuál de ellos puede actuar como mejor predictor.

Para ello se consideraron los índices P235, P240 y OLR, pues presentaron las mayores correlaciones medianas espaciales significativas en un mayor número de boxes. P240 constituye el mejor índice en 6 de los 12 meses del año (Tabla 4). En aquellos meses en los que la correlación máxima no se produce con P240 (Feb, Mar, Jun, Jul, Oct y Dic) la diferencia entre su coeficiente y el que corresponde a la mejor correlación es siempre inferior a 0.05, y por lo tanto se lo consideró

**Tabla 3.** Correlación entre los distintos índices y valores de anomalías de precipitación por Season (caso Niño / caso Niña).

DEF	N220	N225	N230	N235	N240	P220	P225	P230	P235	P240	Olr
Box01	-0.07 / 0.21	-0.15 / 0.22	-0.21 / 0.23	-0.27 / 0.25	-0.20 / 0.25	0.21 / 0.37	0.18 / 0.35	0.15 / 0.34	0.11 / 0.32	0.08 / 0.32	-0.11 / -0.22
Box02	0.54 / 0.51	0.52 / 0.52	0.54 / 0.50	0.49 / 0.51	0.51 / 0.51	0.60 / 0.58	0.60 / 0.58	0.60 / 0.59	0.60 / 0.59	0.59 / 0.59	-0.62 / -0.63
Box03	0.78 / 0.54	0.72 / 0.49	0.68 / 0.52	0.67 / 0.54	0.65 / 0.63	0.76 / 0.63	0.77 / 0.63	0.77 / 0.63	0.77 / 0.63	0.77 / 0.63	-0.74 / -0.65
Box04	0.77 / 0.60	0.80 / 0.58	0.77 / 0.57	0.77 / 0.56	0.76 / 0.54	0.85 / 0.65	0.86 / 0.66	0.86 / 0.67	0.86 / 0.67	0.86 / 0.68	-0.84 / -0.69
Box05	0.15 / 0.21	0.21 / 0.23	0.15 / 0.24	0.02 / 0.26	0.12 / 0.31	0.37 / 0.36	0.35 / 0.35	0.34 / 0.35	0.32 / 0.35	0.30 / 0.35	-0.33 / -0.25
Box06	0.48 / 0.67	0.55 / 0.64	0.45 / 0.59	0.46 / 0.57	0.35 / 0.60	0.35 / 0.62	0.37 / 0.63	0.38 / 0.64	0.40 / 0.64	0.40 / 0.64	-0.52 / -0.61
Box07	0.29 / 0.63	0.40 / 0.62	0.46 / 0.62	0.48 / 0.63	0.45 / 0.62	0.35 / 0.64	0.35 / 0.64	0.37 / 0.64	0.39 / 0.65	0.40 / 0.65	-0.50 / -0.64
Box08	0.77 / 0.60	0.70 / 0.60	0.73 / 0.61	0.79 / 0.62	0.70 / 0.63	0.80 / 0.64	0.80 / 0.65	0.80 / 0.66	0.80 / 0.67	0.80 / 0.68	-0.75 / -0.66
Box09	0.49 / 0.55	0.50 / 0.54	0.50 / 0.56	0.44 / 0.53	0.35 / 0.53	0.57 / 0.70	0.56 / 0.75	0.56 / 0.68	0.55 / 0.68	0.54 / 0.68	-0.62 / -0.75
Box10	0.51 / 0.70	0.52 / 0.69	0.48 / 0.67	0.64 / 0.70	0.61 / 0.70	0.66 / 0.74	0.65 / 0.75	0.65 / 0.75	0.64 / 0.76	0.65 / 0.75	-0.71 / -0.80
Box11	0.71 / 0.74	0.66 / 0.74	0.67 / 0.72	0.69 / 0.70	0.63 / 0.69	0.81 / 0.74	0.81 / 0.75	0.80 / 0.75	0.80 / 0.76	0.79 / 0.76	-0.77 / -0.76
Box12	0.82 / 0.74	0.79 / 0.76	0.86 / 0.75	0.82 / 0.75	0.83 / 0.75	0.82 / 0.72	0.82 / 0.74	0.83 / 0.75	0.84 / 0.76	0.84 / 0.77	-0.86 / -0.79
Box13	0.63 / 0.61	0.58 / 0.57	0.63 / 0.60	0.57 / 0.60	0.58 / 0.57	0.60 / 0.66	0.62 / 0.68	0.62 / 0.69	0.63 / 0.71	0.63 / 0.72	-0.71 / -0.59
Box14	0.56 / 0.67	0.67 / 0.65	0.62 / 0.64	0.66 / 0.63	0.65 / 0.62	0.78 / 0.75	0.78 / 0.76	0.78 / 0.78	0.78 / 0.76	0.78 / 0.76	-0.68 / -0.66
Box15	0.87 / 0.71	0.90 / 0.74	0.90 / 0.72	0.87 / 0.70	0.88 / 0.68	0.80 / 0.75	0.83 / 0.77	0.85 / 0.78	0.86 / 0.79	0.87 / 0.80	-0.88 / -0.69
Box16	0.73 / 0.59	0.70 / 0.56	0.70 / 0.56	0.70 / 0.56	0.66 / 0.57	0.63 / 0.57	0.65 / 0.58	0.66 / 0.60	0.68 / 0.61	0.69 / 0.62	-0.03 / -0.16
Total	0.595 / 0.606	0.620 / 0.590	0.625 / 0.595	0.650 / 0.585	0.620 / 0.586	0.645 / 0.645	0.650 / 0.655	0.655 / 0.665	0.660 / 0.670	0.670 / 0.680	-0.695 / -0.666

como predictor para cada mes del año en una primera aproximación.

Nos referiremos en adelante a este análisis como, "Ajuste 1". Por otro lado, se utilizó un segundo criterio para elegir predictor más adecuado y se seleccionó a aquel índice que para una dada estación del año, presentaba mejor correlación en al menos dos de los tres meses en cuestión, resultando P240 y OLR como los estimadores preferenciales (en adelante, "Ajuste 2").

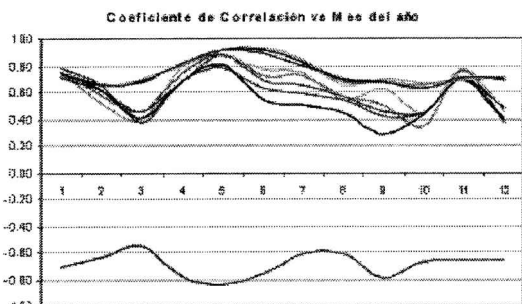
**Estimaciones de valores de precipitación**

Se estudiaron diversas funciones de ajuste entre las anomalías mensuales de precipitación y el índice predictor correspondiente a cada mes del año: lineales, polinómicas, senoidales

y combinación entre ellas, para toda la región durante el período 1975-1991. El ajuste se realizó mensualmente para cada box en particular y luego se seleccionó como más apropiado para el conjunto a la función correspondiente al box que presentara mayor coeficiente de correlación, mayor varianza explicada y menor varianza no explicada. Esta función seleccionada se consideró como representativa del conjunto en un determinado mes y se aplicó a todos los boxes. Se realizaron 3 ensayos diferentes que se detallan a continuación:

**Tabla 4.** Distribución anual del índice de con mejor correlación (columna 2). Predictor seleccionado según dos criterios diferentes (columnas 4 y 5, ajustes 1 y 2

Mes	Índice	R	Ajuste 1	Ajuste 2
Ene	P240	0.82	P240	OLR
Feb	P235	0.69	P240	OLR
Mar	P235	0.68	P240	P240
Abr	P240	0.67	P240	P240
May	P240	0.79	P240	P240
Jun	P235	0.81	P240	P240
Jul	P235	0.82	P240	P240
Ago	P240	0.65	P240	P240
Sep	P240	0.56	P240	P240
Oct	OLR	-0.58	P240	OLR
Nov	P240	0.67	P240	OLR
Dic	OLR	-0.70	P240	OLR



**Figura 2.** Marcha anual de los coeficientes de correlación entre los distintos índices y valores de las anomalías de precipitación.

a) Ensayo L1: Ajuste 1 (lineal): Se planteó en este punto un ajuste lineal entre las anomalías de precipitación y el índice P240. Los resultados se presentan en la Tabla 5a.

En negrita se detallan valores significativos al 95% de confianza. En primer lugar se observa que los valores de los coeficientes de correlación en aquellos meses en los que P240 no era el mejor estimador (Feb, Mar, Jun, Jul, Oct y Dic) son superiores a los registrados previamente. Sin embargo, sigue siendo notoria la menor correspondencia en primavera.

b) Ensayo NL1: Ajuste 1 (no lineal): Se planteó un ajuste no lineal entre las anomalías de precipitación y P240. Se propuso una función de 2do grado asociada a un término senoidal de forma de acompañar y atenuar las fluctuaciones de las anomalías de precipitación. Los resultados se presentan en la Tabla 5b. En los meses primaverales la función no lineal tiene un grado de ajuste más adecuado, según se refleja en el valor de R correspondiente. Sólo febrero resulta explicado más adecuadamente por un ajuste lineal.

c) Ensayo NL2: Ajuste 2 (no lineal): De igual forma que en el caso anterior, se planteó un ajuste no lineal entre las anomalías de precipitación y el predictor seleccionado en el llamado "Ajuste 2" de la tabla 5 con el mismo tipo de función. Los resultados se presentan en la Tabla 5c. En los meses primaverales la función no lineal propuesta tiene un grado de ajuste más adecuado que las anteriores, según se refleja en su valor de R.

Sin embargo Diciembre parece ser explicado más adecuadamente por un ajuste no lineal del tipo 1.

Una vez definidas las funciones de ajuste entre las anomalías de lluvia y el índice seleccionado como predictor en cada uno de los ensayos, se consideró en cada mes, sólo a aquellas que mostraron correlación signi-

ficativa al 95% entre el ajuste y la serie de precipitación areal en al menos un 75% de los boxes. De esta manera las funciones resultantes son espacialmente representativas de la totalidad del área de estudio. Ninguno de los casos superó este umbral en agosto, septiembre y octubre.

Por lo tanto, se concluye que la precipitación en estos meses no es predecible por un único predictor en toda el área. Luego, como primer criterio para determinar la función mensual más representativa del conjunto de boxes, se calculó para cada ajuste, la máxima varianza no explicada mensual, pues es un indicador del máximo error cometido al aplicar dicho ajuste (Tabla 6a). Por otro lado, como criterio adicional, se estimó en forma mensual, la varianza no explicada promedio de cada ajuste, es decir, se obtuvo una aproximación del error medio que puede cometerse al aplicar dicho ajuste (Tabla 6b). En Febrero, por ejemplo, la elección de la función representativa es simple. Se observan valores de varianza máxima no explicada similares entre NL1 y NL2 (0.75 y 0.74, respectivamente) y más baja para L1 (0.64), por lo cual se escoge como función representativa a L1. Para otros meses en cambio, la elección no es tan sencilla. Por ejemplo, en Enero, dado que NL1 presenta menor valor representativo del mes, aunque su varianza no explicada promedio para el conjunto de boxes es menor que la correspondiente a L1 (0.43 y 0.36, respectivamente). Luego, como NL2 no presentaba valores significativos de correlación al 95% en más del 25% de los boxes, no se consideró para la elección de la función de ajuste en este mes. Por su parte Marzo, por ejemplo, presenta para cada ajuste, los mismos valores de varianza máxima no explicada (0.63) y de varianza no explicada media (0.5). Por ende, la elección del ajuste L1 como función representativa del conjunto de boxes para el mes, se debe



**Tabla 5.** Función de Ajuste entre los distintos Predictores y las Anomalías mensuales de Precipitación en cada box. a) Caso Ajuste 1 (lineal). b) Ajuste 1 (no lineal). c) Ajuste 2 (no lineal). La variable Prom es la anomalía de precipitación estimada a través del ajuste.

	Ajuste LI (P240)	R	Ajuste NL1 (P240)	R	Ajuste NL2 (P240 y OLR según Season)	R
Ene	Prom = -140.9 + 0.277 * P240	0.90	Prom = -153.86 + 0.5773 * P240 - 0.0004 * P240 + 10.6006 * sin(P240)	0.93	Prom = -148.04 + 125.094 * OLR - 0.2424 * OLR + 1409.42 * sin(OLR)	0.91
Feb	Prom = -84.27 + 0.18973 * P240	0.84	Prom = -65.973 + 0.107723 * P240 + 0.000864 * P240	0.82	Prom = 431.703 + 0.00727 * OLR - 8.2814 * sin(OLR)	0.86
Mar	Prom = -104 + 0.24047 * P240	0.82	Prom = -116.13 + 0.296277 * P240 - 0.00057 * P240	0.83	Prom = -116.13 + 0.296277 * P240 - 0.00057 * P240 - 4.6161 * sin(P240)	0.83
Abr	Prom = -188 + 0.41513 * P240	0.87	Prom = -146.87 + 0.2136 * P240 + 0.000204 * P240 + 6.69712 * sin(P240)	0.88	Prom = -146.87 + 0.2136 * P240 + 0.000204 * P240 + 6.69712 * sin(P240)	0.88
May	Prom = -78.8142 + 0.2151 * P240	0.92	Prom = -68.226 + 0.134381 * P240 + 0.0000951 * P240	0.94	Prom = -68.226 + 0.134381 * P240 + 0.0000951 * P240 + 12.3646 * sin(P240)	0.94
Jun	Prom = -66.6043 + 0.2418 * P240	0.92	Prom = -56.876 + 0.184363 * P240 + 0.000793 * P240 - 9.8902 * sin(P240)	0.83	Prom = -56.876 + 0.184363 * P240 + 0.000793 * P240	0.93
Jul	Prom = -226.7078 + 0.5611 * P240	0.97	Prom = -132.1 + 0.15427 * P240 + 0.000388 * P240	0.88	Prom = -107.11 + 0.398203 * P240 + 0.00019 * P240	0.82
Ago	Prom = -68.9768 + 0.2935 * P240	0.76	Prom = -194.65 + 0.438145 * P240 - 0.00017 * P240 - 23.762 * sin(P240)	0.79	Prom = -194.65 + 0.438145 * P240 - 0.00017 * P240	0.79
Sep	Prom = -81.5961 + 0.1648 * P240	0.74	Prom = -119.02 + 0.322657 * P240 - 0.00015 * P240 - 10.649 * sin(P240)	0.76	Prom = -703.07 + 181.964 * OLR + 55.5513 * sin(OLR)	0.84
Oct	Prom = -12.4964 + 0.232813 * P240	0.73	Prom = 85.0038 + 0.71839 * P240 + 0.001032 * P240 + 4.27838 * sin(P240)	0.79	Prom = -335.600 + 2746.74 * OLR - 5.0485 * OLR + 37923.2 * sin(OLR)	0.88
Nov	Prom = -129.406 + 0.2952 * P240	0.88	Prom = -123.81 + 0.278605 * P240 + 0.0000432 * P240	0.89	Prom = 2449.69 - 1998.6 * OLR + 3.66126 * OLR	0.83
Dic	Prom = -152.4 + 0.3845 * P240	0.83	Prom = -233.06 + 0.640552 * P240 - 0.00014 * P240 - 50.106 * sin(P240)	0.80	Prom = -411.44 + 345.492 * OLR - 632.34 * OLR + 5567.05 * sin(OLR)	0.85

únicamente a cuestiones de simplicidad matemática, pues es más sencillo trabajar con ecuaciones lineales.

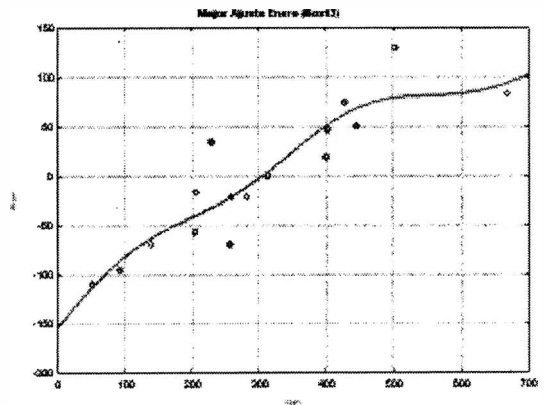
Lo mismo ocurre en la estación intermedia fría (Abril, Mayo y Junio). De esta manera se determinaron las funciones correspondientes según el mes del año (sombreado, Tabla 6).

Cabe notar que en seis de los nueve meses el ajuste no lineal se presenta como la mejor alternativa representando el 66.6% de los casos, lo que justifica su inclusión en el análisis realizado. Más aún, tanto en Marzo como en Abril las varianzas explicadas y no explicadas de los ajustes L1 y NL1 son similares (Tabla 6 a y b). Por lo tanto, la elección de una ecuación lineal se fundamenta exclusivamente en criterios de simplicidad. Las expresiones del ajuste NL1 resultan también características en dichos casos, con lo cual, el porcentaje de meses representados por las ecuaciones no lineales, alcanza el 88.8%. La Figura 3 esquematiza, como un caso representativo, el ajuste entre la anomalía mensual de precipitación y la función final de ajuste propuesta (NL1) para el mes de enero en el box 13. Se observa claramente como el término senoidal tiende suavizar las fluctuaciones del ajuste y de esta manera la función acompaña más sutilmente a los datos observados.

**Verificación del método**

Para la verificación de la metodología empleada se trabajó con datos de lluvia mensual durante el período 92-99.

Se consideraron campos de precipitación media mensual observados en dicho intervalo y se elaboraron, campos estimados con la función de ajuste seleccionada (Tabla 6). A modo de ejemplo en la Figura 4 se presentan para el mes de enero, el campo medio mensual real observado (izquierda) y el estimado por medio de las funciones de ajuste (derecha). Se observa una interesante concordancia. Ambos campos muestran un máximo de lluvias que abarca los boxes 4 y 8, con un gradiente



**Figura 3.** Ajuste NL1 entre valores de P240 (W/m<sup>2</sup>) y Anomalía de Precipitación en mm. (r = 0.91).

**Tabla 6.** Máxima varianza no explicada por cada ajuste para el período 1975 – 1991 en el total de boxes (a) Varianza no explicada promedio por cada ajuste para el mismo período (b) Esquema final de selección de la función de ajuste más adecuada en sombreado.

a / b	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
L 1	0.75 / 0.36	0.64 / 0.48	0.63 / 0.50	0.64 / 0.46	0.59 / 0.36	0.75 / 0.38	0.73 / 0.37				0.70 / 0.52	0.72 / 0.52
N L 1	0.69 / 0.43	0.75 / 0.54	0.63 / 0.50	0.64 / 0.46	0.58 / 0.36	0.73 / 0.39						0.64 / 0.47
N L 2		0.74 / 0.54	0.63 / 0.50	0.66 / 0.48	0.58 / 0.35	0.73 / 0.39					0.75 / 0.52	0.59 / 0.48

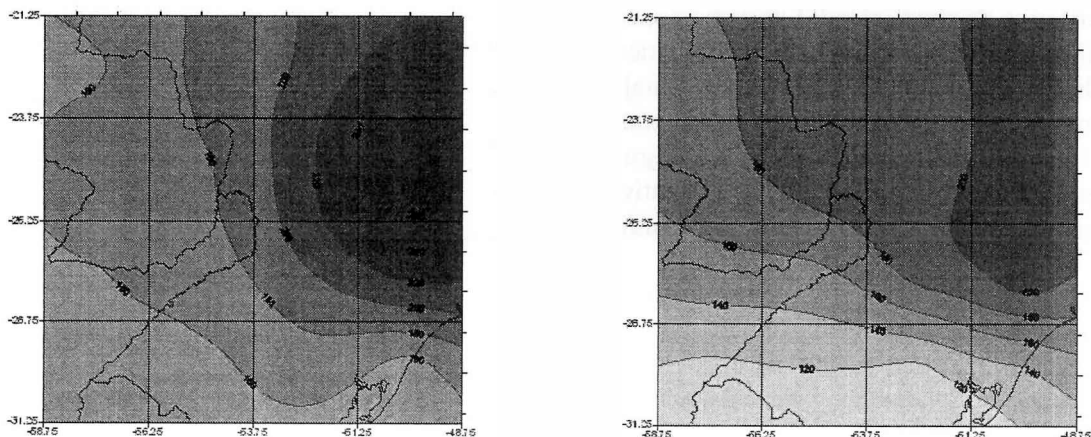
principal en dirección NE - SW. Este patrón de similitud se observa en 7 de los 9 meses, con mayor o menor medida.

### CONCLUSIONES

1. Si bien el valor mensual de OLR es una herramienta útil para determinar zonas con actividad convectiva, sobre todo en regiones cercanas a los trópicos, parece no ser siempre el mejor estimador directo de la lluvia. Existen no obstante, índices derivados de la OLR, como el número de días en el mes (N240) en los cuales el valor de dicha variable supera cierto umbral de radiación previamente convenido ( $240 \text{ W/m}^2$ ) o la diferencia entre OLR y dicho umbral (D240), que aparecen como otros posibles estimadores. Más aún, una combinación determinada por el producto entre ambos índices (P240) resulta ser más apropiada.

2. El análisis de la evolución temporal de los coeficientes de correlación obtenidos entre las anomalías de lluvia en cada box y cada uno de los posibles estimadores, mostró en términos generales, tanto en marzo como en septiembre - octubre una disminución de la respuesta de todos los índices. Los mayores valores se encuentran durante principios del invierno (mayo a julio) y en verano (noviembre a enero). Los índices Pj en general, muestran un patrón más suave que los correspondientes Nj.

3. En general, se observa que la presencia del evento Niño, actúa como intensificador de las correlaciones estacionales durante todo el año, aunque la cantidad de boxes con correlación significativa es menor que en los casos en que no está presente. En particular, el aumento es más evidente en primavera y otoño, mientras en invierno y verano lo es, pero en menor medida.



**Figura 4.** Campo real de precipitación media mensual para enero 1992 – 1999 (izq). Campo estimado de precipitación para el mismo mes y período. La separación entre isohietas es de 50 mm.

4. Se observa que la presencia del evento Niña se detecta únicamente como intensificador de las correlaciones en primavera. No obstante, a diferencia del caso anterior, la cantidad de boxes con correlación significativa estacional es mayor.
5. Si bien P240 es el índice que estima mejor la precipitación espacialmente (representa la mayor cantidad de boxes) no resulta ser predictor preferencial para toda la región, temporalmente ya que en diciembre la OLR se erige como el estimador más apropiado.
6. De las distintas funciones predictoras propuestas, el ajuste no lineal resulta más apropiado en el 66.6% de los casos. Más aún, si se tiene en cuenta que en marzo y en abril la elección de una ecuación lineal se fundamente únicamente en criterios de simplicidad elevando al 88.8% su relevancia.

## REFERENCIAS

- Almeida, L. V. y Barros, V. R., 1998. Estudio de la relación entre la radiación de onda larga saliente (OLR) de la subcuenca del río Paraguay y el caudal en Puerto Bermejo. *Meteorológica*, Vol. 23, N°1 y 2, pág. 37-45.
- Arkin, P. y Ardanuy, P. E., 1989. Estimating Climate-Scale Precipitation from Space: A Review. *Journal of Climate*, Vol. 2, pág. 1229-1238.
- Arkin, P., Krishna, A. V. R. y Kelkar, R., 1989. Large Scale Precipitation and Outgoing Longwave Radiation from INSAT-1B during the 1986 Southwest Monsoon Season. *Journal of Climate*, Vol. 2, pág. 619-629.
- Barrera, Daniel, 2005: Análisis comparativo de los mapas de precipitación obtenidos a partir de datos pluviométricos y estimaciones satelitales, IX Congreso Argentino de Meteorología, Buenos Aires, Argentina.
- Barrera, Daniel F., 2006: The feasibility of hydrological forecasts using precipitation estimates obtained from geostationary satellites. En prensa en el libro *Environmental change and rational water use*. International Geographic Union -Commission for Water Sustainability-. Eds. Olga Scarpatti and Anthony Jones.
- González, M. H., 1997 Factores que determinan el Régimen de Precipitaciones en Argentina Subtropical, Tesis Doctoral (DCAO, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires).
- González M.H. y Velasco, I., 1992: Aspectos de la precipitación de enero en el centro y noreste del país, *Geoacta*, vol 19, pág. 51 a 62.
- González Marcela y Velasco Inés, 1995: Delineación de áreas con precipitación usando imágenes NOAA. *Meteorológica*, Vol 20, N° 1 y 2, pág. 67 a 74.
- González y Velasco, 1995: Rainfall area identification using satellite data, *CLIMATE RESEARCH*, vol 5, n° 3, pág. 259 a 267.
- González, M. H., Barros, V. R. y Doyle, M., 2002. Relation between the onset and end of the South American summer monsoon and rainfall in subtropical South America. *Climate Research*, Vol. 21, pág. 141-155.
- Griffith, C. G., Woodley, W. L., Grube, P. G. Martin, D. W., Stout, J. y Sikdar, D. N., 1979. Rain estimation from geosynchronous satellite imagery visible and infrared studies. *Monthly Weather Review*, Vol. 106, pág. 1153-1171.
- Gruber, A. y Winston, J. S., 1978. Earth-Atmosphere radiative heating based on NOAA scanning radiometer measurements. *Bull. Am. Met Soc.*, Vol. 59, pág. 1570-1573.
- Gruber, A. y Winston, J. S., 1978. Earth-Atmosphere radiative heating based on NOAA scanning radiometer measurements. *Bull. Am. Met Soc.*, Vol. 59, pág. 1570-1573.
- Kilonsky, B. J. y Ramage, S. C., 1976. A technique for estimating tropical open ocean rainfall from satellite observations. *J. Appl. Meteor.*, Vol. 15, pág. 972-975.
- Kousky, V. E., 1988 Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South America sector. *Revista Brasileira de meteorología*, Vol 3., pág 217-231.
- Lau, K. M. y Chan, 1983. Short-Term climate variability and the atmospheric teleconnections from satellite-observed outgoing longwave radiation, Part I: Simultaneous relationships. *J. Atm. Sci.*, Vol. 40, pág. 2735-2750.

- Liebmann, B., Kiladis, G. N., Vera, C. S., Saulo, A. C y Carvalho, L. M. V., 2004. Subseasonal variations of rainfall in South America in the vicinity of the Low-Level Jet east of the Andes and comparison to those in the South Atlantic Convergence Zone. *Journal of Climate* in press.
- Scofield, R y Kuligowski, R, 2003. Status and outlook of operational satellite algorithms for extrema events. *Weather and forecasting* (18), 1037-1051.
- Vila, Daniel, Velasco, I y Goniadzki, D., 2001. Evaluación de un algoritmo de estimación satelital de precipitación con datos de pluviómetros: estudio de dos casos de tormentas intensas. IX Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología, Buenos Aires, Argentina.