

# Relación de las anomalías climáticas de la atmósfera libre sobre Costa Rica y la variabilidad de las precipitaciones durante eventos de El Niño

LUIS FERNANDO ALVARADO

Instituto Meteorológico Nacional, Ministerio del Ambiente y Energía,  
San José, Costa Rica

Walter Fernández

Laboratorio de Investigaciones Atmosféricas y Planetarias,  
Escuela de Física y Centro de Investigaciones Geofísicas,  
Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica

(Recibido 20 Marzo 2001, aceptado 30 Junio 2001)

## ABSTRACT

The main physical causes of the sharp seasonal and inter-annual changes in the two rainfall regimes of Costa Rica during El Niño events are explained by means of the results of Alvarado and Fernández (2001). It is found that the rainfall anomalies are associated with: (i) the persistence of the northerly winds in the lower troposphere and the intensification (weakening) of the easterlies in the summer (winter) period, whose interaction with topography enhances the Föhn effect, (ii) the development of anomalous westerly winds in the upper troposphere during summer, (iii) the sharp decrease of humidity in the lower troposphere and its increase at mid-levels, (iv) the shorter time of permanence over Costa Rica of the ITCZ and its location further South than usual on the Pacific, (v) the considerable increase in wind shear during winter and summer, (vi) the higher values in equivalent potential temperature ( $q_e$ ) and the higher elevation of the convectively unstable layer, which implies a greater potential for deep convection, (vii) the decrease in the tropical cyclone activity in the Caribbean Sea and its increase in the Pacific Ocean, and (viii) the greater convergence in Western Caribbean due to a greater dynamic instability associated to the intensification of the lower level jet.

## 1. Introducción

Hay consenso en que bajo la influencia de El Niño, las Temperaturas Superficiales del Mar (TSM) son anormalmente altas en el Pacífico Tropical y los vientos alisios son débiles. Además de lo anterior se ha encontrado una fuerte correlación entre la aparición de El Niño y las condiciones extremas de lluvia (lluvias intensas o sequías) que se registran a nivel mundial (Ropelewsky y Halper, 1987; Philander, 1990).

Desde el punto de vista climático, la importancia de El Niño en Costa Rica se debe a que se le ha relacionado con períodos muy calientes de la temperatura del aire, como por ejemplo en los años 1982-83 y 1997-98; también se le ha asociado con menos número de temporales del Pacífico, y en general con la alteración espacio-temporal del régimen pluviométrico que ha motivado la mayoría de las sequías o períodos secos que han afectado al occidente del país (Fernández y Ramírez, 1991). Este criterio se ha

confirmado fielmente durante las últimas dos décadas, especialmente en los años 1983, 1986, 1991-1994 y 1997-1998, los cuales han sido años bajo efectos de El Niño. Waylen *et al.* (1996a,b) encontraron una fuerte correlación de signo positivo entre las lluvias del verano boreal en la Vertiente Pacífica y el IOS, particularmente en julio y agosto, menos fuerte o ausente durante setiembre y octubre. En resumen, estos autores concluyen que las regiones del noroeste y suroeste de la Vertiente del Pacífico de Costa Rica muestran precipitaciones anuales iguales o menores al promedio durante la fase negativa del IOS.

En un estudio de escala mundial, Ropelewsky y Halper (1987) determinaron que la región centroamericana es de las que presentan las más bajas coherencias (0.77) entre El Niño y la lluvia, sin embargo destacan el hecho que de los 19 episodios de El Niño estudiados, 14 de ellos produjeron condiciones secas en el período de julio a octubre, y que de las 9 temporadas más secas entre 1902 y 1976, 5 de ellas coincidieron con el Niño. Por lo tanto, previo a la década de los años 90, se creía que toda

Centroamérica sufría de sequías asociadas con El Niño. Sin embargo, Fernández y Ramírez (1991), Enfield (1996), Waylen *et al.* (1996a,b) afirmaron que al menos para Costa Rica la señal de El Niño no era regionalmente homogénea como lo concluyeron Ropelewsky y Halper (1987), ya que a principios de la década de 1990 se determinó una tendencia muy consistente de anomalías pluviométricas de carácter estacional en la región oriental del país, la cual presentaba un comportamiento opuesto al del lado occidental. En la costa oriental la señal de El Niño tiende a reflejarse en una mayor cantidad e intensidad de lluvias en los meses de julio y agosto. Sobre este asunto existe una polémica entre los autores, pues algunos no creen que se deba únicamente a El Niño. Enfield y Alfaro (1998) y Alfaro (1998) propusieron la hipótesis de que el exceso de lluvias en el oriente de América Central está más fuertemente asociado con las anomalías de la TSM en el Atlántico Tropical que con las del Pacífico. Aunque, si bien es cierto que El Niño está asociado con un 25% de la varianza de las temperaturas del ATN (Enfield y Mayer, 1997) -y que hay una débil correlación positiva (contemporánea) entre ambos- un 75% de la variación del ATN sugiere que ambos fenómenos son ortogonales, o sea, totalmente independientes. Aparentemente el 25% de la varianza ejercida por El Niño sobre el ATN se produce particularmente durante el verano boreal (comunicación personal con Enfield y Alfaro, 1998), de ahí que se le vincule con el aumento de las lluvias estivales en el oriente de Centroamérica.

Previamente, Hastenrath (1976) había sugerido que el Océano Atlántico ejercía cierta influencia en el clima de la región centroamericana. Waylen *et al.* (1996a) corroboraron esas apreciaciones al concluir que el índice de Oscilación del Atlántico Norte (OAN) y la precipitación mensual en la Vertiente del Caribe de Costa Rica revelan una correlación positiva dominante durante el verano boreal, no obstante advirtieron que el número de estaciones meteorológicas que reportaron asociaciones significativas fue menor que con el IOS. Por lo tanto, al menos para el Caribe centroamericano, las correlaciones pluviométricas con las anomalías de la TSM del Atlántico Tropical Norte son en gran parte de signo opuesto a las del Pacífico Tropical (El Niño), de ahí que ambos océanos exhiban influencias indirectas en el clima de toda la región (Enfield, 1996; Alfaro, 1998).

Por lo tanto, con base en los argumentos anteriores, parece ser que las distorsiones en el régimen normal de lluvias en el país son una función del arreglo que tomen las ATSM en ambos océanos. De modo que las lluvias en el oriente (Vertiente del Caribe) aumentan (disminuyen) considerablemente cuando las anomalías de las TSM de ambos océanos son positivas (negativas). En el occidente (Vertiente del Pacífico) se sugiere que las lluvias aumentan (disminuyen) cuando las anomalías de las TSM en Atlántico Tropical son positivas (negativas) y las correspondientes al Pacífico son negativas (positivas). Este

último criterio es similar al que plantearon Enfield y Alfaro (1998), sin embargo, ellos no encontraron variaciones regionales, es decir, el criterio se aplica por igual a todo el istmo Centroamericano.

En este trabajo, se ha seleccionado a la atmósfera libre sobre Costa Rica como área de estudio. Debido a la gran escala espacio-temporal de El Niño y al pequeño tamaño del país, es suficiente para el análisis la medición diaria local que realiza la estación aerológica del aeropuerto Juan Santamaría (10°N, 84°12'O, 920 m.s.n.m.), cuyo código de identificación internacional ante la Organización Meteorológica Mundial (OMM) es 78762.

Se desarrolla el tema de la influencia indirecta que ejerce El Niño en las anomalías de los regímenes de precipitación de Costa Rica. En vista de que el fenómeno no es el responsable directo de esas anomalías, sino un forzador, se exponen una serie de razonamientos termodinámicos, dinámicos y sinópticos que permiten comprender cómo las variaciones en todos los parámetros analizados inciden en las sequías e inundaciones que se producen a uno y otro lado del país.

## 2. Revisión de la climatología del régimen estacional de lluvias

En relación con la distribución estacional y horaria de la precipitación, Costa Rica presenta dos tipos de regímenes de lluvia, conocidos como régimen del Pacífico y régimen del Caribe en alusión a la región geográfica en que se localizan. La compleja orografía del país es uno de los factores meteorológicos que más influencia tiene en las condiciones climáticas y por eso siempre es necesario hacer referencia a ella.

Una extensa cadena montañosa, orientada de sureste a noroeste (Figura 1), divide a Costa Rica en dos vertientes

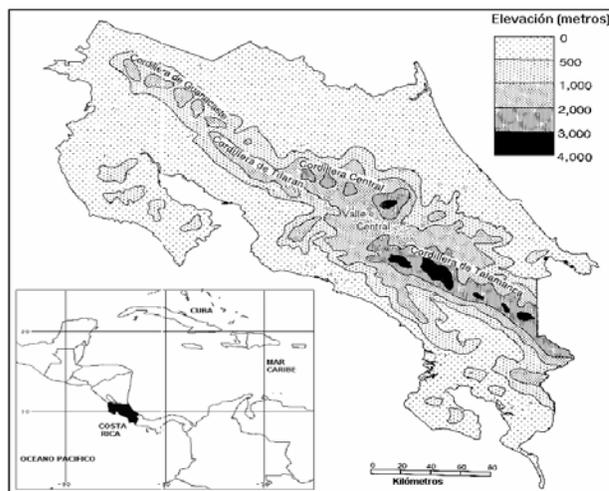


Figura 1. Principales rasgos fisiográficos de Costa Rica.

climáticas: la Vertiente del Pacífico (VPA) y la Vertiente del Caribe (VCA). El sistema montañoso se caracteriza por presentar las máximas elevaciones en la cordillera de Talamanca (al sureste) y las mínimas en la cordillera de Guanacaste (al noroeste), además, existen numerosos pasos montañosos que conectan a las dos vertientes, especialmente en el centro y noroeste.

Por la posición latitudinal, el territorio nacional está sometido la mayor parte del año al régimen dominante de los vientos alisios, que junto con la orografía motivan climas muy distintos de una vertiente a la otra.

La Vertiente del Pacífico comprende las regiones a sotavento, es decir, las ubicadas entre la costa Pacífica y las cimas del sistema orográfico central, lo que incluye también al Valle Central (VCE). En esta investigación se seleccionó a la estación meteorológica de Puntarenas (78760) como representativa del régimen de lluvias de tipo Pacífico. Este régimen (Figura 2) se caracteriza por tener una época lluviosa bien definida que coincide con el verano y otoño boreal (mayo a noviembre), la cual es interrumpida por un período relativamente seco en julio y agosto, conocido como el “veranillo”. La época seca se extiende de diciembre a abril (invierno y primavera boreal). La distribución horaria de la lluvia presenta un máximo durante la tarde y primeras horas de la noche, correspondiente a un régimen de lluvias predominantemente convectivo.

La Vertiente del Caribe, localizada a barlovento del sistema montañoso, representada en este estudio por la estación meteorológica de Limón (78767), muestra una distribución mensual y horaria de la precipitación diferente a la VPA (Figura 2). Nótese que éste régimen presenta

durante todo el año, sin embargo las precipitaciones disminuyen en marzo y setiembre a valores entre 100 y 200 mm mensuales, por esa razón se dice que no hay una estación seca definida tal como la que existe en el Pacífico. La distribución horaria presenta dos regímenes según sea la época; un primero durante el verano boreal, de carácter convectivo, con las lluvias concentrándose en horas de la tarde, y el segundo durante el invierno, con precipitaciones estratificadas distribuidas a lo largo de todo el día y ligadas a efectos mecánicos (ascenso forzado) que ejercen las montañas a vientos que inciden perpendicularmente. Para una descripción completa del régimen de lluvias de Costa Rica y los mecanismos generadores refiérase a Hastenrath, 1967; Laporte, 1977; Zárate, 1977; Grandoso, 1979; Grandoso *et al.*, 1981; Zárate, 1980; Alfaro, 1981, Chacón y Fernández, 1985, Campos, 1988 y Fernández *et al.*, 1996.

Los principales sistemas meteorológicos de escala regional y local que controlan el régimen diurno de lluvias en Costa Rica son: los sistemas de brisa, los frentes de convergencia local, convección diurna, ascensos forzados por las montañas, convergencia friccional. En la escala sinóptica los principales sistemas que influyen en el régimen estacional son: los vientos alisios, los vientos ecuatoriales, la Zona de Confluencia Intertropical (ZCI), los frentes fríos, ondas tropicales, vaguadas de altura (como la vaguada troposférica tropical), ciclones tropicales, subsidencia asociada a anticiclones de altura. En la gran escala, las variaciones interanuales y mensuales son atribuidas a fenómenos océano-atmosféricos: la Oscilación Cuasi-bienal (OCB) de los vientos de la estratosfera, las fases frías y calientes del fenómeno ENOS y las oscilaciones de las presiones y las temperaturas del Océano Atlántico (Waylen *et al.*, 1996b; Enfield, 1996; Enfield y Mayer, 1997; Alfaro, 1998).

### 3. Variaciones interanuales y estacionales más otras anomalías de las precipitaciones durante El Niño

Estudios de escala hemisférica y global introdujeron en la década de los años setenta y ochenta la idea de que Centroamérica era afectada por sequías meteorológicas durante los episodios de El Niño (Hastenrath, 1976; Ropelewsky y Halpert, 1987; Rogers, 1988; Aceituno, 1988). Sin embargo, estudios recientes -de escalas espaciales más pequeñas- concluyeron que los efectos de El Niño en la variabilidad interanual y estacional de las precipitaciones son más complejos y variados que los identificados previamente (Fernández y Ramírez, 1991; Waylen *et al.*, 1996a,b).

Actualmente se considera que las anomalías interanuales de las precipitaciones están fuertemente reguladas no sólo por los mecanismos de interacción océano-atmósfera del Océano Pacífico Tropical, sino también por los del Océano Atlántico (Hastenrath, 1984; Enfield, 1996; Waylen *et al.*, 1996a; Alfaro, 1998). De

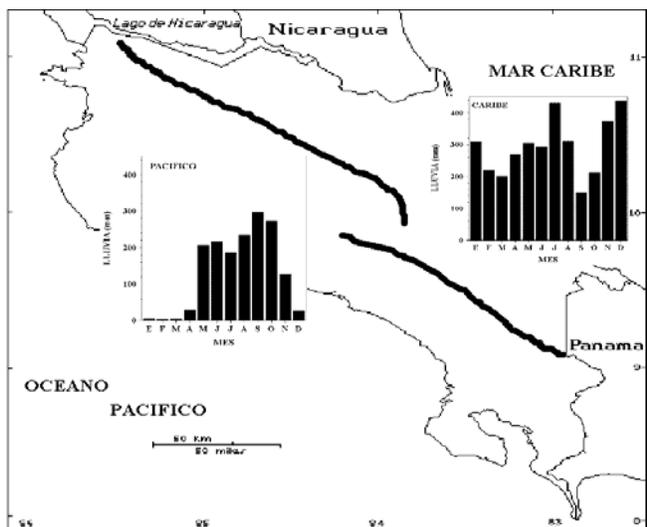


Figura 2. Distribución mensual de los dos regímenes de precipitación de Costa Rica.

máximos en los meses de julio y diciembre, que son precisamente los meses del “veranillo” y de época seca en la VPA, respectivamente. Normalmente en la VCA llueve

hecho, contrario a lo que se pensaba hace algunos años, ahora se afirma que el Océano Atlántico ejerce mayor influencia en el régimen de lluvias de Centroamérica que el Océano Pacífico (Enfield, 1996; Alfaro, 1998). Esta influencia se refleja en la forma de correlaciones positivas (simultáneas) entre las temperaturas del ATN y las precipitaciones. No obstante, se ha planteado que estas asociaciones podrían ser el resultado del efecto remoto que ejerce El Niño del Pacífico, esto por cuanto un análisis de correlaciones rezagadas entre las ATSM de los Océano Pacífico y ATN mostró una correlación significativamente alta (+0.5), con el calentamiento del Pacífico antecediendo al del Atlántico, lo que refuerza la hipótesis de que el primero es el forzador de las anomalías del segundo (Enfield y Mayer, 1997; Alfaro, 1998). Previamente Enfield (1996) había llegado a la misma conclusión, asegurando que los eventos ENOS del Pacífico anteceden por 4-5 meses a los del ATN, sin embargo advierte que el ENOS sólo logra explicar un 25% de la varianza del ATN, y que dicha relación es más fuerte durante el invierno y primavera (Enfield y Mayer, 1997). Por estos motivos vale la pena corregir el criterio que privó hasta hace poco con respecto a que el Océano Pacífico es el único modulador de las anomalías climáticas de escalas interanuales de nuestra región. Lo más razonable de concluir es que Centroamérica exhibe una fuerte teleconexión climática tanto con el Océano Pacífico Ecuatorial (ENOS) como con el Atlántico Tropical.

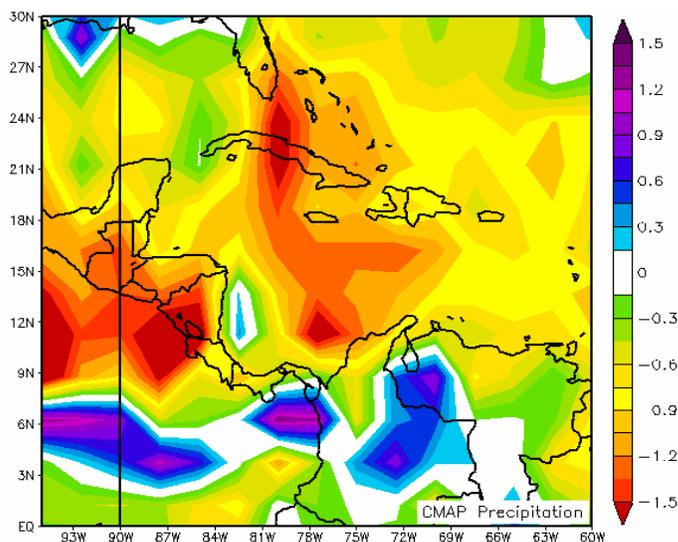
No cabe duda que las anomalías de gran escala, asociadas con la variabilidad de los Océanos Pacífico y Atlántico, se acentúan regional y localmente debido a características oceánicas y fisiográficas muy particulares que presenta Costa Rica, tales como: el carácter de istmo, el estar rodeados por sendos océanos y masas continentales, la compleja orografía, la configuración y la orientación de las costas (Figura 1) y el domo térmico del Océano Pacífico. Todos estos elementos juegan un papel decisivo en la caracterización climática y en las condiciones extremas que se manifiestan durante eventos ENOS del Pacífico y del Atlántico. Debido a esos factores fisiográficos Costa Rica experimenta condiciones del tiempo muy distintas de una costa a la otra, y de una época a la otra.

Las investigaciones locales han concluido que durante los eventos de El Niño el régimen de precipitación es el elemento que sufre la mayor alteración respecto de sus valores normales, tanto en las cantidades que se acumulan como en la distribución en espacio y tiempo (Fernández y Ramírez, 1991). Sin embargo, se debe de considerar otro factor quizá de igual importancia y que experimenta grandes variaciones: **el viento**. No hay que olvidar que este elemento ejerce una fuerte influencia en el régimen de lluvias del país (Zárate, 1977) y que por lo tanto cualquier variación significativa en su comportamiento ocasionará alteraciones en las precipitaciones.

El reanálisis de la Figura 3 recopila en forma macroescalar y simplificada del comportamiento regional

de las anomalías de la lluvia en el período estival de los eventos de El Niño. Se aprecia el dominio de anomalías negativas en toda América Central y el Mar Caribe, con un máximo déficit en el sur de Nicaragua y noroeste de Costa Rica. En tanto se registran superávits de lluvias en partes de Colombia y Venezuela. Sobresale también una zona distintiva de anomalías positivas frente a las costas caribeñas de Nicaragua y Costa Rica, la cual demuestra que no toda Centroamérica experimenta sequías durante El Niño.

Figura 3. Reanálisis de un índice de las anomalías de lluvia durante el período estival de eventos de El Niño (CDC).



### 3.1 Vertiente del Pacífico

Se ha determinado que en promedio la estación lluviosa durante los años de El Niño sufre una considerable disminución en las cantidades anuales de lluvia (Figura 4a). Este patrón también es consistente con la variación interanual de las anomalías estivales (Figura 4b). De hecho se ha propuesto que la disminución de las precipitaciones es porcentualmente mayor en los meses estivales de julio y agosto (Fernández y Ramírez, 1991).

Por lo tanto, según la Figura 4, se puede concluir que tanto las anomalías estacionales como las anuales reflejan la influencia de El Niño en las cantidades de lluvia. No obstante, hay excepciones como la de 1972, la cual no se ajusta al modelo conceptual mencionado, pero que sin embargo es contado como una anomalía propia de El Niño por las razones que se explicarán más adelante. Además, en los eventos bianuales (e.g. 1982-83, 1997-98) nótese que por lo general el primer año fue más seco en términos relativos y absolutos que el segundo año (Figuras 4a y 5a).

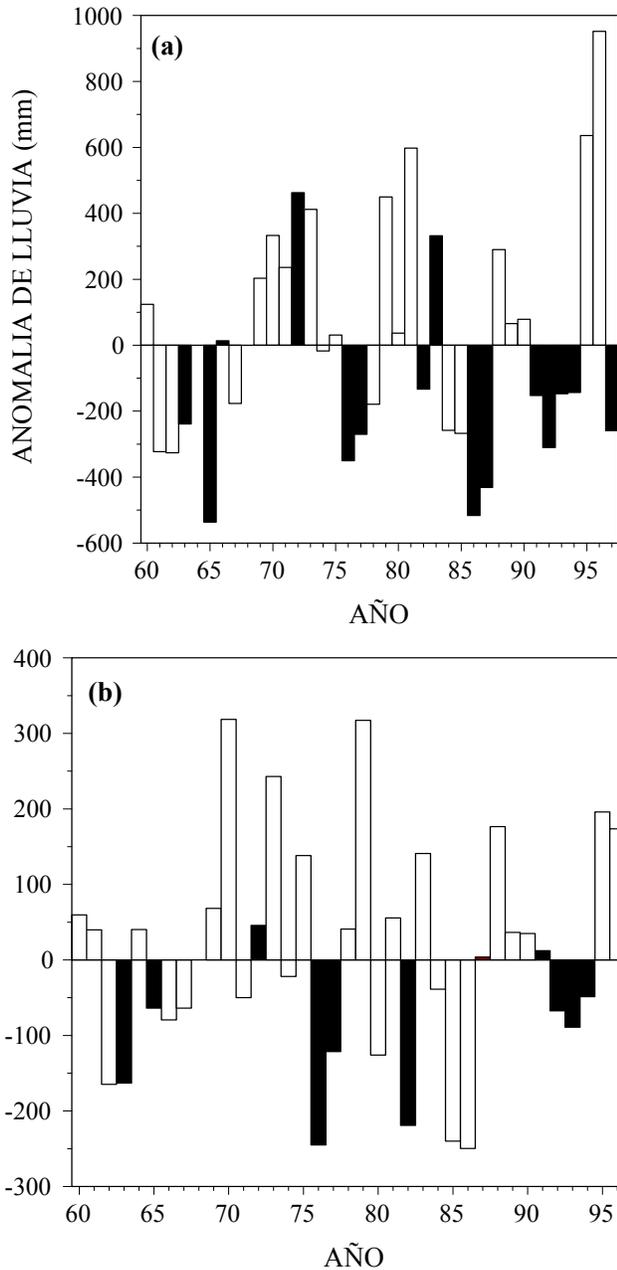


Figura 4. Variación (a) anual y (b) estival de las anomalías de lluvia en Puntarenas (Vertiente del Pacífico) en el periodo 1960-97. Las barras negras denotan eventos de El Niño.

Alfaro (1998) propuso, basado en un modelo VARMA (Modelo Vectorial Autorregresivo-Medias Móviles), que la región VCE es la única zona del régimen Pacífico que no experimenta una influencia significativa de El Niño, sino más bien la variabilidad pluviométrica de esta zona es modulada mayormente por las anomalías de temperatura del Océano Atlántico Tropical, las cuales también determinan las variaciones en la VCA. Sin embargo los resultados de Waylen *et al.* (1996b) para San José así

como la evidencia observacional de la variación interanual de las lluvias en la estación meteorológica de Alajuela (Figura 5b) -ambas pertenecientes al VCE- indican un patrón definido de anomalías negativas de lluvias en prácticamente todos los veranos de eventos de El Niño. Nótese que el mismo resultado se obtiene al emplear los acumulados anuales (Figura 5a) y los invernales (no hay figura).

A continuación se enumeran y describen otras de las anomalías que se han detectado y documentado durante los eventos de El Niño en la VPA:

- La duración efectiva de la estación lluviosa disminuye y suele terminar más temprano que lo normal (IMN, 1987; Zárate, 1990; Fernández y Ramírez, 1991; Alfaro, 1998). Esto es consecuencia tanto del prematuro inicio de la estación seca, así como del aumento del número de días secos dentro del período lluvioso, principalmente durante los meses del veranillo (Zárate, 1990). Son frecuentes los casos en que el veranillo se extiende desde mediados de junio hasta mediados de setiembre.

- La anomalía en el número de días secos es un parámetro que refleja con mayor consistencia y coherencia el impacto de El Niño que las cantidades de lluvia (IMN, 1986), esto por cuanto se han presentado casos en que las cantidades anuales y estacionales de lluvia son mayores que el promedio, tal como sucedió en Puntarenas en 1972 (Figura 4b) y en Alajuela en 1987 (Figura 5b).

- Waylen *et al.* (1996a) señalaron que la influencia estacional de El Niño en las lluvias es menos marcado -o incluso hasta nula- durante setiembre y octubre. Esto se debe probablemente a que la cortante vertical no experimenta en ese período variaciones tan marcadas como las que se registran en invierno y verano. Además, bajo la premisa de que hay una anormal cantidad de días secos en esos dos meses, una posible explicación para que en ciertos casos las lluvias sean anómalamente mayores, es que en los días con lluvia se presentan eventos muy intensos que pueden llegar a igualar -o hasta superar- los valores medios mensuales.

- Derivado del punto anterior, se ha planteado que durante El Niño, tanto en el Pacífico como en el Caribe, las lluvias muestran una tendencia a ser aguaceros de corta duración pero de alta intensidad, producidos por superceldas convectivas localizadas en lugares propicios para su formación (IMN, 1987; Fernández y Ramírez, 1991).

- En una publicación nacional (IMN, 1987) se sugirió que la atmósfera sobre Centroamérica debería de manifestarse con un mayor grado de estabilidad estática, frenando así la formación de nubes convectivas. Este argumento justifica en parte la menor frecuencia de lluvias de carácter convectivo en la VPA, pero no explica porqué razón los pocos eventos convectivos que se presentan son más intensos que lo usual. Por lo tanto se trata de una disminución de días con eventos convectivos, pero

ALVARDO: Relación de las anomalías climáticas de la atmósfera libre sobre Costa Rica y la variabilidad de las .....

compensado por un aumento en la intensidad de la convección.

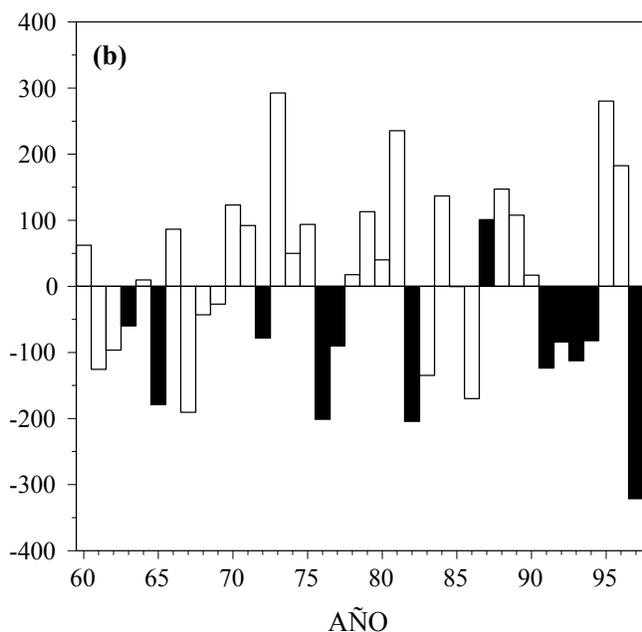
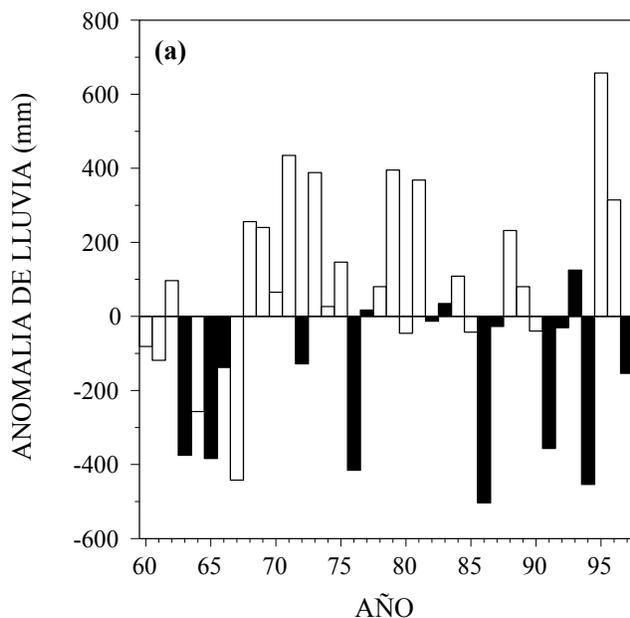


Figura 5. Igual que en la Figura 4 pero para la estación meteorológica de Alajuela (Valle Central).

- La Figura 6 muestra un esquema simplificado de la distribución espacial de las anomalías porcentuales de la lluvia anual. Nótese que las isolíneas de anomalías se extienden en forma paralela a las cordilleras, lo cual denota la fuerte dependencia con la orografía local. Los déficit más altos son del orden del 30% -en casos muy extremos de hasta el 40%- y ocurren preferentemente en el noroeste y

oeste del país (Guanacaste, Valle de Parrita). Por lo tanto, estas últimas son las regiones mayormente impactadas por la sequía meteorológica asociada con El Niño.

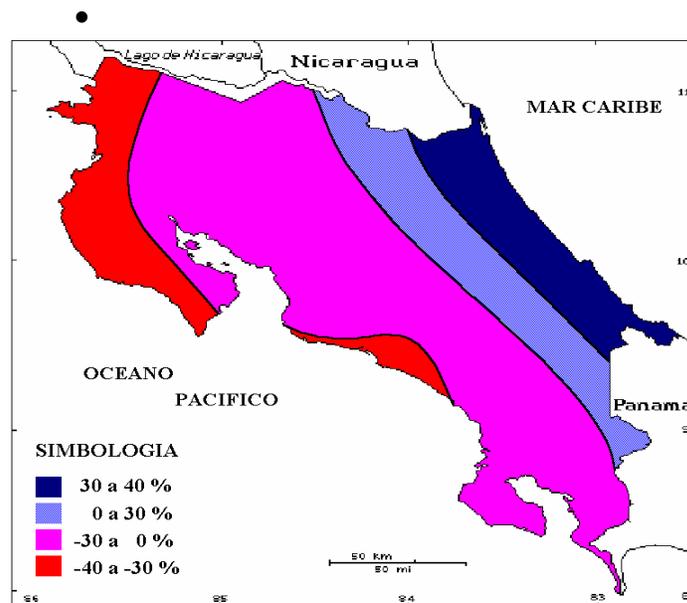


Figura 6. Distribución típica de las anomalías porcentuales de las precipitaciones anuales durante eventos de El Niño en Costa Rica.

- Si bien en la comunidad científica nacional ha prevalecido el criterio de que el inicio (final) de la estación lluviosa tiende a demorarse (anticiparse) durante los eventos de El Niño, las investigaciones que demuestran ese criterio observacional son muy escasas como para poder confirmar científicamente dicha hipótesis. No obstante algunos autores como Zárate (1990), Enfield y Alfaro (1998) y Alfaro *et al.* (1998) coinciden en que El ENOS no ejerce una influencia apreciable en las fechas de inicio de la estación lluviosa, sino más bien en las fechas de retiro. En este último caso la relación es tal que los eventos cálidos (fríos) del ENOS del Pacífico se correlacionan con un final prematuro (tardío) de la estación lluviosa. La anomalía en la fecha de finalización de las lluvias varía de unas cuantas semanas a un mes. El final prematuro de la estación lluviosa propicia que la estación seca siguiente sea más prolongada que lo normal.

- La disminución de las lluvias, que eventualmente se producen en los meses de setiembre y octubre en la VPA, es en parte una consecuencia de la ausencia o de la poca efectividad de los temporales originados por ciclones tropicales en el Mar Caribe. Se ha demostrado que tanto en el Océano Atlántico como en el Mar Caribe el número de ciclones tropicales disminuye considerablemente durante episodios de El Niño, no así en el Océano Pacífico, donde más bien se forman una mayor cantidad de ciclones (Gray, 1984, 1993; Banichevich y Lizano, 1998). Han habido casos de temporadas en que no se formaron tormentas

tropicales en el Mar Caribe, tales como en 1957, 1965, 1972, 1976, 1977, 1982, 1983, 1986, 1987, 1990-1992, 1994 y 1997, todas los cuales estuvieron bajo los efectos de El Niño.

**3.2 Vertiente del Caribe**

Esta región muestra un patrón de correlación más complicado que la del tipo VPA. Sin embargo, se puede señalar en forma aproximada que la señal de El Niño en

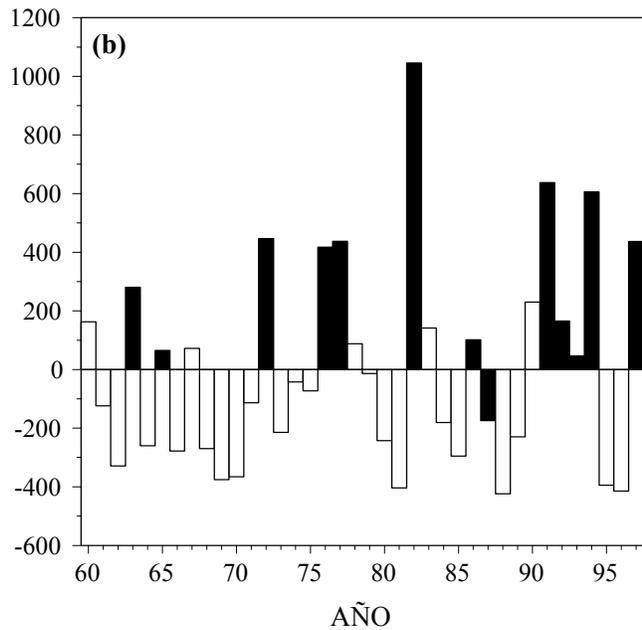
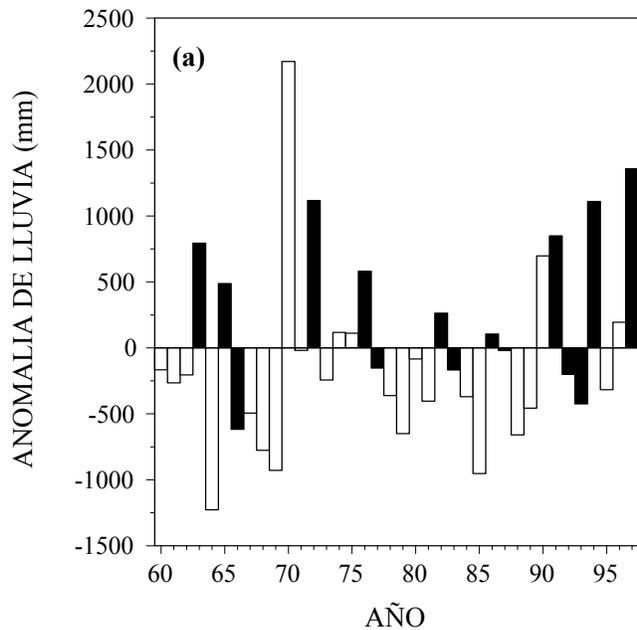


Figura 7. Igual que en la Figura 4 pero para Limón (Vertiente del Caribe).

esta zona tiende a ser opuesta a la del Pacífico, es decir,

experimenta un aumento en las cantidades anuales de precipitación (Figura 6 y 7a). Otra característica, contrario a lo que sucede en el Pacífico, es que en los eventos de El Niño bianuales se observa que por lo general el primer año suele ser más lluvioso que el segundo. El aumento de las precipitaciones es más marcado durante el verano (Figura 7b), lo que demuestra que la señal del fenómeno es evidente tanto en las variaciones anuales como las estacionales.

Aunque en los inviernos de El Niño (Figura 7, esquema derecho) tiende a producirse un déficit en las cantidades de lluvia, no parece que sea una característica particular de estos eventos, pues el mismo comportamiento se ha observado en inviernos que no han estado bajo la influencia de El Niño (e.g., 1968, 1978 y 1988). En este sentido es importante resaltar el periodo de inviernos secos que se viene registrando en la VCA desde 1975 (Figura 7, izquierda), dentro del cual se han presentado episodios de El Niño y La Niña. A primera vista esto hace pensar que efectivamente los inviernos secos -vistos individualmente- están exclusivamente vinculados con El Niño, parece ser que el predominio de éstos desde 1975 es parte de una variación natural de escala decadal. Sin embargo, esta variación climática de carácter local coincide casualmente con la proposición que impulsa Trenberth y Hoar (1996) sobre un cambio climático a raíz del aumento del número de eventos de El Niño a partir de 1976.

Los resultados anteriores corroboran los investigados por Waylen *et al.* (1996a), según el cual la costa del Caribe recibe mayor cantidad de precipitación durante el verano de los eventos de El Niño, pero menor durante el invierno. Contrario a este criterio, Enfield (1996) y Alfaro (1998) demuestran que, en el caso de la VCA, las ATSM del Océano Pacífico no ejercen una influencia significativa en el campo de anomalías de las lluvias. Es posible que en una escala interanual la ausencia de una relación entre esos parámetros sea consecuencia del comportamiento opuesto que manifiestan las anomalías de lluvia de una época a la otra (Figuras 6b y 7b), lo cual podría causar un efecto neutro o compensatorio del fenómeno en análisis que ignoren ese tipo de variaciones netamente estacionales.

Investigaciones previas determinaron una correlación positiva entre las ATSM en el ATN y las anomalías de lluvia en la VCA del país, es decir, eventos cálidos (fríos) en el ATN ocurren simultáneamente con un aumento (disminución) de las precipitaciones en esta región. En este contexto vale la pena cuestionarse si el enfriamiento que imperó en las aguas del Océano Atlántico durante la década de 1970 y parte de la de 1980 (Carton y Huang, 1994; Kushnir, 1994; Nobre y Shukla, 1996), influyó -al igual que El Niño- con los déficit de precipitación invernales de la VCA durante ese período.

En una escala estacional, las anomalías en la precipitación de la VPA y la VCA muestran un comportamiento inversamente proporcional durante los

ALVARDO: Relación de las anomalías climáticas de la atmósfera libre sobre Costa Rica y la variabilidad de las .....

eventos de El Niño (Figuras 8 y 9), es decir, durante el verano la VPA se comporta más seco y la VCA más húmedo que lo normal. Durante el invierno la tendencia es que las precipitaciones disminuyan en todo el país (no hay figura), aunque en la VPA los meses invernales coinciden con el ciclo normal de época seca, motivo por el cual tiene poco sentido la disminución que se registra.

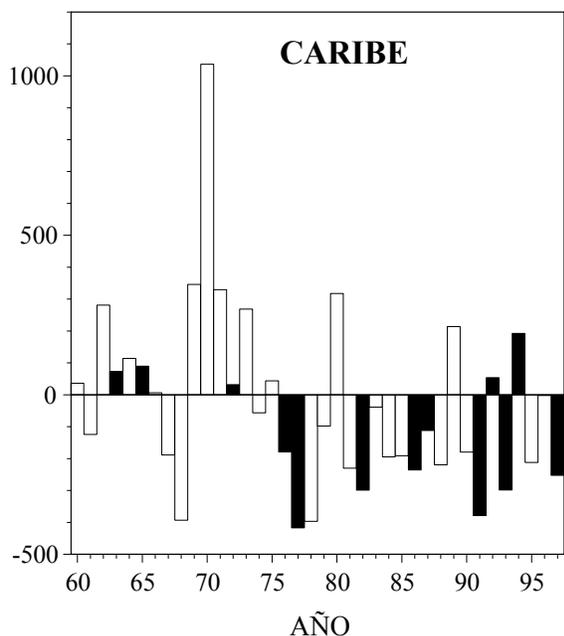
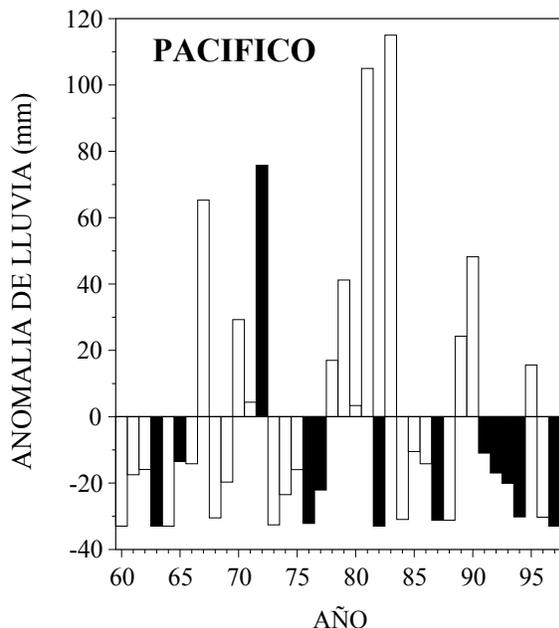


Figura 8. Variación anual de las anomalías de lluvia durante los inviernos de El Niño en la Vertiente del Pacífico y del Caribe.

Estos resultados confirman también las apreciaciones de Enfield (1996) y Waylen *et al.* (1996a), según la cual las correlaciones invernales entre el índice

IOS y las anomalías de lluvia en todo el país revelan una asociación positiva. Los mismos autores concluyeron que las correlaciones entre las lluvias en el Caribe centroamericano y los índices de oscilación de la presión del Océano Atlántico Norte (OAN) son de signos contrarios a los del Pacífico sólo durante el verano.

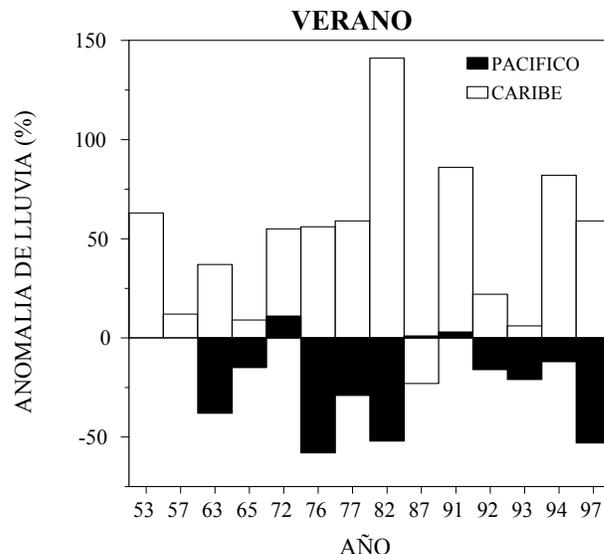


Figura 9. Variación de las anomalías (%) de lluvia durante los meses de julio (verano) de los eventos de El Niño en la Vertiente del Pacífico y del Caribe.

#### 4. Influencia de las anomalías de la atmósfera libre en el comportamiento estacional de las precipitaciones

Glantz (1996) advierte que no todas las anomalías climáticas registradas durante eventos de El Niño son precisamente causadas por éste, algunas suceden por coincidencia o por causas normales, y en otras aún no está claro con exactitud el vínculo existente. Se ha insistido y comprobado que existen otros fenómenos que en determinados casos pueden coincidir en tiempo y presentar la misma señal que El Niño, uno de ellos son las anomalías en el campo de la TSM y presión del Océano Atlántico. Un ejemplo de lo anterior es el gran superávit de precipitaciones que ocurren en la estación lluviosa sobre Centroamérica (mayo a noviembre) cuando las TSM son cálidas en el ATN y frías en el Pacífico Oriental (Hastenrath 1976, 1978, 1984; Enfield, 1996; Alfaro, 1998 Enfield y Alfaro, 1998).

En este trabajo no se pretende determinar si las anomalías climáticas en el país están más correlacionadas con uno u otro océano. Se desea únicamente mostrar la variabilidad de algunos elementos termodinámicos y de flujo durante los eventos cálidos del Océano Pacífico (El Niño). Los análisis realizados hasta el momento demuestran que en efecto hay características o anomalías climáticas que se repiten de un evento al otro e independiente de la región del país.

En síntesis se puede establecer que en la Vertiente Pacífica del país, incluyendo al Valle Central, El Niño se asocia con anomalías negativas de la precipitación y aumento de la velocidad de los vientos alisios durante la estación lluviosa. Sin embargo, la disminución es más consistente y considerable durante el verano boreal. En la VCA, hay consenso en que el efecto se refleja en anomalías de signo positivo durante el verano, mientras que en el invierno hay una señal □ menos consistente- de anomalías negativas.

A continuación se proponen y se describen, con base en razonamientos físicos, los orígenes de las anomalías que experimentan los dos regímenes de precipitación de Costa Rica durante los episodios de El Niño:

La disminución de las lluvias en la Vertiente del Pacífico es consecuente con la disminución del contenido de humedad en la troposfera baja (véase Figuras 19, 20 y 21 de Alvarado y Fernández, 2001), el cual a su vez es el reflejo del aumento de las temperaturas. No obstante, es evidente que los sondeos medios de humedad (véase Figuras 19 y 20 de Alvarado y Fernández, 2001) no son capaces de resolver el exceso de lluvias que se produce en la Vertiente del Caribe, lo cual se debe a que la estación de radiosondeo está ubicada al lado opuesto (ciudad de Alajuela), o sea, a sotavento de la cordillera central, donde el efecto catabático -debajo de los 3000 m- se intensifica como consecuencia de las mayores velocidades que manifiestan los vientos alisios. Por lo tanto, el resecaimiento que se refleja en todo el país en el reanálisis espacial presentado por Alvarado y Fernández (2001, véase su Figura 21) es un tanto cuestionable en la VCA, debido a que filtra los efectos locales que resultan de la interacción de la fuerte advección de humedad desde el Mar Caribe, la convergencia friccional y el ascenso forzado por las pendientes orientales de las cordilleras. El reanálisis del campo de anomalías de lluvias sí muestra un máximo en el suroeste del Mar Caribe (Figura 3). De manera que las características orográficas y fisiográficas del país, así como fenómenos meteorológicos de mesoescala son determinantes en la distribución de las anomalías de humedad y de las precipitaciones. En niveles superiores □ donde el efecto perturbador de la orografía y la mesoescala es menor- el aire es más húmedo que lo normal (véase Figuras 19 y 20 de Alvarado y Fernández, 2001), lo cual seguramente forma parte inherente de las anomalías macroescalares del fenómeno. Esta humedad proviene de la intensa evaporación a la que es sometido todo el centro y este del Océano Pacífico Tropical, incluyendo a las aguas que circundan nuestro país.

Al parecer, la troposfera baja, a sotavento de las montañas, no se comporta de igual forma que la troposfera media y alta debido a que los movimientos mesoescalares controlan las capas superficiales de la atmósfera, produciendo anomalías de humedad de signo negativo a sotavento y positivo a barlovento.

La intensificación anómala en niveles bajos y

medios de los vientos del este en el segundo semestre del año, contribuye con el aumento (disminución) de las lluvias a barlovento (sotavento) por medio de procesos anabáticos (catabáticos) de ascenso (descenso) orográfico forzado. La persistencia durante todo el año de vientos de componente norte es otro de los factores que incide en el aumento (disminución) de lluvias de la VCA (VPA).

Otro factor que limita o impide las lluvias en la Vertiente del Pacífico es el poco alcance o profundidad que presumiblemente presenta el frente de brisa de mesoescala que se produce a nivel del suelo entre los vientos alisios y los vientos de componente oeste (Zárate, 1977). En condiciones normales, durante el verano boreal, el frente de brisa se forma incluso en las mismas faldas occidentales de la cordillera principal. No obstante, con vientos del este más fuertes habría mucha resistencia para que el frente penetrara al interior del país.

Sinópticamente, el aumento de los vientos del este y del norte en la troposfera baja y media (véase Figuras 26, 27 y 42 de Alvarado y Fernández, 2001), principalmente en los meses de la estación lluviosa, causa que la Zona de Confluencia Intertropical (ZCI) se mantenga la mayor parte del tiempo al sur del istmo centroamericano. Esta alteración en la posición media de la ZCI se debe a que los principales centros de convergencia se producen lejos del istmo y también por el desarrollo -fuera de temporada- del domo frío sobre el océano Pacífico al noroeste de Costa Rica. El resultado final es una corta permanencia de la ZCI sobre Centroamérica y consecuentemente la disminución de las precipitaciones. Por otro lado, en vista de que la posición de la ZCI depende parcialmente de la temperatura superficial del mar, el calentamiento de la franja ecuatorial del Océano Pacífico es otro factor que mantendría a la ZCI más al sur de su ubicación climatológica (Philander, 1990). La mayor velocidad de los alisios y por lo tanto el desplazamiento meridional anómalo de la ZCI puede ser una consecuencia de los valores positivos que manifiesta el índice de oscilación de presión del Atlántico Norte (OAN), pues valores positivos de este índice reflejan una intensificación del sistema de alta presión semipermanente de las Azores, y como lo indica Hastenrath (1978), un desplazamiento hacia el ecuador de ese mismo anticiclón. Consecuentemente, las implicaciones para el occidente de Centroamérica se evidenciarían en sequías meteorológicas.

El debilitamiento en niveles bajos y medios de la componente norte y este del viento durante el invierno (véase Figuras 26a, 27a y 42 de Alvarado y Fernández, 2001), tiene el efecto de disminuir: la advección horizontal de humedad desde el Mar Caribe, la convergencia friccional cerca de la costa y el ascenso mecánico por las laderas montañosas de la VCA, todo lo cual produce una disminución de las precipitaciones en esa región. Según Waylen *et al.* (1996a) la disminución de las lluvias invernales está vinculada con correlaciones positivas del IOS por medio del debilitamiento de los vientos, el cual se atribuye a la reducción del gradiente de presión entre

Norteamérica y Centroamérica. Precisamente durante el invierno una de las teleconexiones más fuertes que manifiesta El Niño es el desarrollo de anomalías negativas de la presión superficial en el Golfo de México, Caribe Occidental, Centroamérica y sureste de Estados Unidos (véase Figura 18 de Alvarado y Fernández, 2001) donde tiende a formarse un sistema semipermanente de baja presión (Aceituno, 1988; van Loon y Labitzke, 1987; Weber, 1990; Knaff, 1997, 1998). Es muy seguro que este sea el sistema que debilita el gradiente de presión y los vientos entre latitudes subtropicales y Centroamérica durante el invierno. Como consecuencia de lo anterior, las precipitaciones en la VCA disminuyen durante el invierno.

Argumentos contrarios al anterior ayudan a justificar el aumento de las lluvias durante el verano en el oriente del país, a causa de la mayor intensidad de los vientos alisios. Este comportamiento podría atribuirse directamente a la intensificación que experimenta el jet de bajo nivel en el Mar Caribe durante los veranos de El Niño (Figura 26 de Alvarado y Fernández, 2001; Mora, 1998) y a la inestabilidad dinámica asociada con la región de salida de ese jet (Amador, 1998). Probablemente un jet más intenso podría conducir a una inestabilidad dinámica más fuerte, la cual reforzaría los movimientos ascendentes en el oeste del Mar Caribe (salida del jet), propiciando con ello un aumento de las precipitaciones en las costas caribeñas de Nicaragua y Costa Rica.

Alvarado y Fernández (2001) encontraron que la cortante vertical del viento es anormalmente mayor durante los eventos de El Niño (véanse sus Figuras 38 y 39), especialmente entre enero y agosto (véase su Figura 41). Según Grandoso *et al.* (1981) el flujo tiene un efecto restrictivo sobre la convección a través de la cortante vertical, pues valores grandes de ésta inciden negativamente en el desarrollo de la convección. Este comportamiento, cuyo impacto es más evidente en la Vertiente del Pacífico, se refleja en una fuerte correlación negativa con el número de eventos convectivos y con las cantidades de lluvia. Este efecto es reforzado por la subsidencia en la mesoescala que produce el descenso altitudinal de los vientos alisios a sotavento del sistema montañoso central (efecto Föhn).

Nótese que los valores anómalamente altos de la cortante vertical durante los eventos de El Niño aparentemente no afectan negativamente el régimen de lluvias en la VCA, pues contrario al Pacífico, las precipitaciones aumentan durante el verano. En este caso se asume que otros mecanismos –que aún no están bien comprendidos- tienden a quebrar la fuerte estabilidad dinámica asociada con la cortante. Se propone que unos de esos mecanismos es el de las pequeñas superceldas convectivas que por lo común se registran en forma muy localizada y cuya energía interna es de una magnitud tal que les permite desarrollarse en un ambiente muy desfavorable. Parece ser que la inestabilidad dinámica es superada por el mayor potencial convectivo y la mayor

profundidad de la capa inestable que muestra la atmósfera durante los eventos de El Niño. Estas superceldas puntuales serían las responsables de las intensas tormentas capaces de producir más de 100 mm de lluvia en menos de 24 horas. Otro mecanismo que motiva el incremento de las lluvias estivales en la parte oriental del país es el temporal. La evidencia observación muestra que los temporales del Caribe son más frecuentes e intensos durante los veranos de eventos de El Niño. Los temporales son por naturaleza fenómenos que producen lluvias continuas e intensas, las cuales se caracterizan porque no son predominantemente de tipo convectivo sino estratiforme (Fernández y Barrantes, 1996). Según Grandoso (1979), las precipitaciones abundantes en el Caribe acontecen cuando se presentan simultáneamente los siguientes factores: (i) vientos del este en una extensa columna troposférica y (ii) el desarrollo de una capa con inestabilidad potencial de mayor espesor que la normal, la cual es liberada gradualmente, a medida que se satura cualquier porción de la capa inestable con el ascenso orográfico. Según Alvarado y Fernández (2001, véase su Figura 20), el contenido de humedad no es un factor limitante debido a que hay un relativo exceso durante El Niño en la troposfera media y alta. Por otro lado, Alvarado y Fernández (2001) concluyeron que la atmósfera sobre Costa Rica manifiesta durante el verano una capa de inestabilidad más profunda (véase Figura 24 de su trabajo). Con respecto al viento, las condiciones para un ambiente lluvioso también son favorables, debido a que en capas bajas y medias dominan vientos del noreste con velocidades más fuertes que lo normal. Por lo tanto la simultaneidad de los dos factores apuntados anteriormente es consecuente con el aumento que experimentan las precipitaciones estivales en el oriente del país. De nuevo se acota aquí la importancia en el clima y tiempo de la acción conjunta y coordinada del viento y de la orografía, los cuales con el ascenso forzado de las masas de aire por las pendientes montañosas, ayudan a liberar la inestabilidad almacenada en la atmósfera.

Si bien la atmósfera local exhibe más energía potencial ( $\theta_e$ ) para ser desatada en forma de convección (véase Figura 24 de Alvarado y Fernández, 2001), ésta no se libera como normalmente lo hace en la estación lluviosa, sino que se efectúa por medio de severas tormentas convectivas, aisladas espacial y temporalmente una de la otra. Este proceso sería más frecuente si existiese en la troposfera baja la suficiente humedad y el mecanismo detonante, factores que por lo general son suprimidos durante El Niño en la VPA. El segundo factor se atribuye a la falta de convergencia en niveles bajos, quizá por el retiro hacia el sur de la ZCI, por la anulación del frente de brisas y por las corrientes subsidentes de mesoescala a sotavento (corrientes catabáticas). Sin embargo, basta que uno o varios de estos mecanismos se torne favorable en determinado día para liberar en una forma muy violenta la energía y la inestabilidad acumulada.

La circulación de la atmósfera alta presenta

anomalías que repercuten en la evolución de la estación lluviosa de la Vertiente del Pacífico. Alvarado y Fernández (2001) encontraron que los vientos de componente oeste, los cuales son propios de la estación seca, se prolongaban un mes más que lo normal. Esto significa que la contracción que experimenta la época lluviosa de la VPA es el resultado del mayor número de días con vientos oestes que se produce en la troposfera alta. En algunos casos esta anomalía podría ser la causa de la demora del inicio de la estación lluviosa.

Gray *et al.* (1992) afirman que las anomalías del flujo del oeste en la troposfera alta intensifican la divergencia de nivel alto en el ecuador, pero la suprimen en latitudes tropicales fuera del ecuador. Como consecuencia, la actividad convectiva aumenta en el Pacífico Ecuatorial pero disminuye en el Pacífico Centroamericano. Además, las anomalías de los vientos zonales del oeste tienen un impacto negativo en las temporadas de huracanes del Océano Atlántico, ya que se asocian con temporadas poco activas, debido a que aumenta la cortante vertical en toda la troposfera. En temporadas de huracanes poco activas las costas occidentales de Centroamérica están menos propensas a experimentar temporales, lo cual motiva un déficit adicional de lluvias.

Gray *et al.* (1992) también aseguran que la convección tropical es influenciada indirectamente por el fenómeno de El Niño a través de su conexión con las fases de la OCB. Según estos autores, la fase del este (oeste) de la OCB tiende a disminuir (aumentar) la convección en latitudes fuera del ecuador. Los resultados de Alvarado y Fernández (2001) confirman esa conclusión, por cuanto en nuestra región (al sur del paralelo 20°N) se desarrollan anomalías negativas de los vientos estratosféricos durante los eventos de El Niño (véase Figuras 40-42 de Alvarado y Fernández, 2001). Además, las anomalías negativas de los vientos estratosféricos en nuestro país son el reflejo de fases del este de la OCB en el ecuador. Por lo que ésta sería otra de las causas dinámicas que explican el origen de la disminución de la convección estival en las regiones occidentales de Costa Rica y en general de Centroamérica.

La presencia (ausencia) de huracanes en el Pacífico Oriental (Mar Caribe) tiene el efecto neto de disminuir las lluvias en la VPA. Este fenómeno se amplifica considerablemente durante El Niño, ya que según Gray (1993) la cantidad de ciclones del Pacífico (Atlántico) aumenta (disminuye). En el Pacífico, gran parte de la nubosidad que se desarrolla en las inmediaciones de los huracanes proviene de la ZCI, la otra parte la origina la convergencia propia del huracán. Esto pone de manifiesto una evidencia observacional según la cual los ciclones del Pacífico tienen la capacidad de afectar la posición latitudinal y meridional de la ZCI, ya que cuando éstos se mueven hacia el este (internándose en el Pacífico) inducen a la ZCI a desplazarse en la misma dirección, dejando a la región centroamericana bajo una atmósfera menos húmeda y relativamente más estable.

## 5. Conclusiones

Dada la importancia que tiene el régimen de lluvias para el país, se estudiaron los efectos de El Niño en relación con la variabilidad interanual y estacional. En la Vertiente del Pacífico la estación lluviosa sufre una considerable disminución en las cantidades anuales de lluvia. Este comportamiento también es consistente con las anomalías negativas halladas en los períodos estivales, donde la disminución es porcentualmente más acentuada. En los eventos bianuales del fenómeno (e.g. 1982-83, 1997-98) el primer año suele ser más seco en comparación con el promedio y con el segundo año.

En la Vertiente del Caribe, El Niño se manifiesta de una forma opuesta al Pacífico, es decir, con un aumento en las cantidades anuales de precipitación. En los eventos bianuales se observó que por lo general el primer año suele ser más lluvioso que el segundo. El aumento anual de las precipitaciones resultó ser más acentuado durante el verano, mientras que en el invierno hay una tendencia a que imperen anomalías negativas, o sea, déficit de lluvias. Sólo durante el invierno se confirman las investigaciones a nivel hemisférico y mundial, en el sentido de que hay un déficit generalizado de lluvias en todo Costa Rica.

Aunque los reanálisis en niveles bajos mostraron un déficit de humedad en todo el país, los movimientos mesoescales controlan y redistribuyen la humedad de una forma tal que produce anomalías de humedad de signo negativo a sotavento (Vertiente del Pacífico) y positivo a barlovento (Vertiente del Caribe). Por este motivo se propone que la disminución (aumento) de las lluvias en la Vertiente del Pacífico (Caribe) es consecuente con la disminución (aumento) del contenido de humedad en la troposfera baja.

La intensificación anómala en niveles bajos y medios de los vientos del este □especialmente en el segundo semestre del año□ contribuye también con el aumento (disminución) de las lluvias a barlovento (sotavento) por medio de procesos anabáticos (catabáticos) de ascenso (descenso) orográfico forzado. Debido a este mismo efecto, los frentes de convergencia en la Vertiente del Pacífico son inhibidos total o parcialmente por la fuerza con que llegan los vientos alisios, eliminando así otra de las fuentes de lluvia de la Vertiente del Pacífico.

La persistencia anual en niveles bajos de los vientos del norte □incluso en épocas en que normalmente fluyen los vientos del sur□ también tiene el efecto neto de disminuir los eventos lluviosos en la Vertiente del Pacífico, pero de aumentarlos en la Vertiente del Caribe.

En una escala sinóptica, el aumento de los vientos alisios en los meses de estación lluviosa así como el calentamiento anómalo en la franja ecuatorial del Océano Pacífico, inducen a que la Zona de Confluencia Intertropical (ZCI) migre a una posición más al sur que lo normal, lo cual contribuye significativamente con la ausencia de lluvias convectivas y temporales en la Vertiente

del Pacífico.

El debilitamiento en niveles bajos y medios de las componentes norte y este del viento durante el invierno tiene el efecto de disminuir la advección horizontal de humedad desde el Mar Caribe, la convergencia friccional cerca de la costa y el ascenso mecánico por las laderas montañosas de las pendientes orientales del país, todo lo cual produce una disminución de las precipitaciones invernales en esa región.

Se propuso, en el contexto de la mayor intensidad que muestra el jet de bajo nivel en el Mar Caribe durante los episodios de El Niño, que otra de las causas del aumento de las lluvias durante el verano en la Vertiente del Caribe se basa en la premisa de que un jet más intenso podría propiciar una inestabilidad dinámica más fuerte, la cual reforzaría los movimientos ascendentes en el área de salida, que corresponde al suroeste del Mar Caribe. Esta es una hipótesis que necesita ser verificada con un estudio más riguroso. Se insta también a investigar directamente el comportamiento de los movimientos verticales para determinar qué tan cierta es la hipótesis anterior.

Se demostró que la cortante vertical del viento es anormalmente mayor durante los eventos de El Niño, especialmente entre el invierno y el verano. Como consecuencia la cortante actúa como un agente erosivo para el desarrollo de la convección, particularmente en la Vertiente del Pacífico, donde la subsidencia de mesoescala refuerza los efectos negativos de la cortante. Es notorio que desde setiembre hasta diciembre no se registraron anomalías significativas del comportamiento y magnitud de la cortante.

En la Vertiente del Caribe la fuerte cortante también limita los eventos convectivos, sin embargo, las abundantes precipitaciones que se registran en el verano no son de origen convectivo, sino que son consecuencia de los temporales, los cuales son fenómenos que producen lluvias continuas e intensas –predominantemente estratiformes– durante varios días. Los tres principales factores que dan origen a un temporal del Caribe son: (i) el mecanismo detonante (que puede ser convergencia en bajo nivel, ascenso orográfico, una baja fría, vaguada de altura, onda del este), (ii) la presencia de vientos del este en toda la troposfera y (iii) el mayor espesor de la capa con inestabilidad. Casualmente estas tres condiciones se pueden presentar durante los veranos de El Niño.

Si bien durante el verano la atmósfera exhibe una mayor energía potencial ( $\theta_e$ ) para ser desatada en forma de convección, en la Vertiente del Pacífico tiende a liberarse en la forma de eventos poco frecuentes, aislados y de fuertes intensidades. Esta anómala actividad convectiva es consecuencia básicamente de la mayor profundidad que presenta la capa inestable, concomitantemente con los factores impulsores de la convección, entre ellos el contenido de humedad y mecanismos detonantes permanentes, los cuales han demostrado coincidir raramente durante los efectos de El Niño.

La circulación anómala de la atmósfera alta (250 hPa) repercute en la estación lluviosa de la Vertiente del Pacífico, puesto que los vientos de componente oeste, los cuales son propios de la estación seca, tienden a permanecer por un tiempo más que el normal. Esto pone de manifiesto que la menor duración que experimenta la estación lluviosa de la Vertiente del Pacífico es una consecuencia de la prolongación anómala o aparición en épocas en que no corresponde de los vientos oestes de la troposfera alta. Además, se sabe que vientos del oeste en el verano tienen un efecto restrictivo en la temporada de huracanes (Gray, 1984, 1993), lo cual se traduce en una menor probabilidad de que Costa Rica sea afectada por un temporal del Pacífico.

Se analizó el efecto que tiene en las lluvias el aumento de los ciclones tropicales de la cuenca del Pacífico Oriental durante eventos de El Niño. Se consideró que éste es otro de los factores que propician la disminución de las precipitaciones en la Vertiente del Pacífico, esto por cuanto la mayoría de los huracanes de esa cuenca nacen a unos cuantos grados al oeste de las costas centroamericanas, y en su desplazamiento hacia el este actúan como una aspiradora, atrayendo hacia sí toda la nubosidad de la ZCI, y dejando una estela de estabilidad sobre Centroamérica. Además, dependiendo de la circulación misma del ciclón, en muchas ocasiones el viento no presenta una componente adecuada para interactuar con la orografía, es decir, el viento tiende a soplar paralelo a las cordilleras, lo cual impide la formación de lluvias orográficas.

### Agradecimientos

Los datos de radiosondeo utilizados fueron proporcionados amablemente por el Instituto Meteorológico Nacional, Costa Rica.

Los autores están profundamente agradecidos con Eric Alfaro, Patricia Ramírez y Eladio Zárate por sus valiosos comentarios y sugerencias.

### RESUMEN

Utilizando los resultados de Alvarado y Fernández (2001), sobre las principales alteraciones climáticas de la atmósfera libre sobre Costa Rica durante los eventos de El Niño, así como aspectos meteorológicos de mesoescala, escala sinóptica y escala planetaria, se explican las causas físicas de los marcados cambios estacionales e interanuales que experimentan los dos regímenes de precipitación de Costa Rica durante los eventos de El Niño. Se encuentra que las anomalías en este elemento están asociadas con (i) la persistencia durante todo el año de vientos del norte en la troposfera baja y la intensificación (debilitamiento) de los estes en el período estival (invernal), lo cual en conjunción con la orografía refuerzan el efecto Föhn, (ii) el desarrollo de vientos anómalos del oeste en plena estación de verano en la troposfera alta, (iii) la acentuada disminución de la humedad en la troposfera baja y aumento en niveles medios, (iv) el menor tiempo de permanencia en el país de la Zona de Confluencia Intertropical y su ubicación más al sur de lo normal en el Pacífico, (v) el considerable aumento de la cortante vertical durante el período invernal y estival, (vi) los mayores valores que presenta la temperatura potencial equivalente ( $\theta_e$ ) y la mayor altura de la capa con inestabilidad convectiva, lo cual denota un mayor potencial para convección profunda, (vii) la

## TOPICOS METEOROLOGICOS Y OCEANOGRAFICOS

disminución de la actividad de ciclones tropicales en el Mar Caribe y el aumento en el Océano Pacífico, y (viii) la mayor convergencia en el Caribe Occidental debido a la mayor inestabilidad dinámica asociada con la intensificación del jet de bajo nivel.

### Referencias

- Aceituno, P., 1988. On the Functioning of the Southern Oscillation in the South American Sector. Part I: Surface Climate. *Mon. Wea. Rev.*, **116**, 505-524.
- Alfaro, E., 1998. *Influencia de los Océanos Pacífico y Atlántico tropical sobre los Patrones de Precipitación en Centroamérica*. Tesis Doctoral. Dpto de Oceanografía, Universidad de Concepción, Chile.
- Alfaro, E., L. Cid y D. Enfield, 1998. Relaciones Entre el Inicio y el Término de la Estación Lluviosa en Centroamérica y los Océanos Pacífico y Atlántico Tropical. *Invest. Mar.*, **26**, 59-69.
- Alfaro, R., 1981. *Algunos Aspectos de la precipitación en Costa Rica*. Tesis de Grado, Escuela de Física, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Alvarado, L.F. y W. Fernández, 2001. Variabilidad Interanual y Estacional de la Atmósfera Libre sobre Costa Rica Durante Eventos de El Niño. *Top. Meteor. Oceanogr.*, **8**(2), xx-xx
- Amador, J., 1998. *Aspectos Dinámicos de la Corriente en Chorro en el Oeste del Mar Caribe Durante el Verano Boreal*. Minicongreso Centro de Investigaciones Geofísicas (31 de julio), Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Banichevich, A. y O.G. Lizano, 1998. Interacción a Nivel Ciclónico-Atmosférico Entre El Caribe y El Pacífico Centroamericano. *Revista Biología Tropical*, **46** (5), 9-21.
- Campos, M., 1988. *Efectos de la Topografía sobre el Clima a Sotavento de las Cordilleras Volcánicas Central, Tilarán y Guanacaste*. Tesis de Grado. Escuela de Física, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Carton, J. y B. Huang, 1994. Warm Event in the Tropical Atlantic. *J. Phys. Oceanogr.*, **24**, 888-903.
- Chacón, R.E. y W. Fernández, 1985. Temporal and Spatial Rainfall Variability in the Mountainous Region of the Reventazón River Basin, Costa Rica. *J. Climatol.*, **5**, 171-188.
- Enfield, D., 1996. Relationship of the Inter-American Rainfall to Tropical Atlantic and Pacific SST Variability. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 3305-3308.
- Enfield, D. y D. Mayer, 1997. Tropical Atlantic Sea Surface Temperature and its Relation to El Niño-Southern Oscillation. *J. Geophys. Res.*, **102** (C1), 929-945.
- Enfiel, D. y E. Alfaro, 1998. The Dependence of Caribbean Rainfall on the Interaction of the Tropical Atlantic and Pacific Oceans. Sometido al Journal of Climate.
- Fernández, W., 1980 Environmental Conditions and Structure of Some Types of Convective Mesosystem Observed over Venezuela. *Arch. Met. Geoph. Biokl*, **29**, 249-2657
- Fernández, W y J. Barrantes, 1996. The Central American Temporal: A long-lived tropical-producing system. *Top. Meteor. Oceanogr.*, **3** (2), 73-88.
- Fernández, W. y P. Ramírez, 1991. El Niño, la Oscilación del Sur y sus Efectos en Costa Rica. *Rev. Tecnología en Marcha*, **11**(1), 3-11.
- Fernández, W., R.E. Chacón y J.W. Melgarejo, 1996. On the Rainfall Distribution with Altitude over Costa Rica. *Revista Geofísica*, **44**, 57-72.
- Glantz, M., 1996. *Corrientes de Cambio: El Impacto de "El Niño" sobre el Clima y la Sociedad*. Ira edición española, Cambridge University Press, 141 pp.
- Grandoso, H., 1979. Estudio Meteorológico de las Inundaciones de Diciembre de 1970 en Costa Rica. *Geof. Int.*, **18**, 129-176.
- Grandoso, H., V. Castro y A. Vargas, 1981. *Características de la Atmósfera Libre sobre Costa Rica y Sus Relaciones con la Precipitación*. Informe Semestral (enero-junio). Instituto Geográfico Nacional, Ministerio de Obras Públicas y Transportes. San José, Costa Rica.
- Gray, W., 1984. Atlantic Seasonal Hurricane Frequency. Part I. El Niño and 30 mb QBO Influences. *Mon. Wea. Rev.*, **112**, 1649-1668.
- Gray, W., J. Sheaffer y J. Knaff, 1992. Influence of the Stratospheric QBO on ENSO Variability. *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**, 975-995.
- Hastenrath, S., 1967. Rainfall Distribution and Regimen in Central America. *Arch. Met. Geoph. Biokl*, **B, 15**, 201-241.
- Hastenrath, S., 1976. Variations in Low-Latitude Circulation and Extreme Climatic Anomalies in the Tropical Americas. *J. Atmos. Sci.*, **33**, 202-215.
- Hastenrath, S., 1978. On Modes of Tropical Circulation and Climate Anomalies. *J. Atmos. Sci.*, **35**, 2222-2231.
- Hastenrath, S., 1984. Interannual Variability and the Annual Cycle: Mechanisms of Circulation and Climate in the Tropical Atlantic Sector. *Mon. Wea. Rev.*, **112**, 1097-1107.
- Hastenrath, S., L. de Castro y P. Aceituno, 1987. The Southern Oscillation in the Tropical Atlantic Sector. *Contrib. Atmos. Phys.*, **60**, 447-463.
- IMN (Instituto Meteorológico Nacional), 1982-1998. *Boletines Climatológicos*. Publicación mensual, Dpto de Climatología. San José, Costa Rica.
- Knaff, J. A., 1997. Implications of Summertime Sea Level Pressure Anomalies in the Tropical Atlantic Region. *J. Climate*, **10**, 789-804.
- Knaff, J. A., 1998. Predicting Summertime Caribbean Pressure in Early April. *Wea. Forec.*, **13**, 740-752.
- Kushnir, Y., 1994. Interdecadal Variations in North Atlantic Sea Surface Temperature and Associated Atmospheric Conditions. *J. Climate*, **1**, 500-511.
- Laporte, S., 1977. *Estimación de la Precipitación en la Cuenca del Río Reventazón Utilizando un Modelo Orográfico*. Tesis de Grado. Escuela de Física, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Mora, I., 1998. *Duración Temporal de los Eventos ENOS y el Comportamiento del Jet de Bajo Nivel en el Mar Caribe*. Minicongreso Centro de Investigaciones Geofísicas, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Nobre y Shukla, 1996. Variations of Sea Surface Temperature, Windstress and Rainfall over the Tropical Atlantic and South America. *J. Climate*, **9**, 2464-2479.
- Philander, S., 1990. *El Niño, la Niña and the Southern Oscillation*. Academic Press, Londres, 289 pp.
- Rogers, J., 1988. Precipitation Variability Over the Caribbean and Tropical Americas Associated with the Southern Oscillation. *J. Climate*, **1**, 172-182.
- Ropelewsky, C. y M. Halpert, 1987. Global and Regional Scale Precipitation Pattern Associated with the ENSO. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 1606-1626.
- Trenberth, K. y T. Hoar, 1996. The 1990-1995 El Niño-Southern Oscillation Event: Longest on Record. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 57-60.
- van Loon, H., y K. Labitzke, 1987. The Southern Oscillation. Part IV: The Anomalies in the Lower Stratosphere of the Northern Hemisphere in Winter and a Comparison with the QBO. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 357-369.
- Waylen, P., C. Caviedes y M. Quesada, 1996a. Interannual Variability of Monthly Precipitation in Costa Rica. *J. Climate*, **9**, 2606-2613.
- Waylen, P., M. Quesada y C. Caviedes, 1996b. Variability of annual precipitation in Costa Rica, and the Southern Oscillation. *J. Climatol.*, **16**, 173-195.
- Weber, G., 1990. North Pacific Circulation Anomalies, El Niño and Anomalous Warmt over the North American Continent in 1986-1988: Possible causes of the 1988 North American Drought. *Int. J. Climatol.*, **10**, 279-289.
- Zárate, E., 1977. *Principales Sistemas de Vientos que Afectan a Costa Rica y sus Relaciones con la Precipitación*. Tesis de Grado. Escuela de Física, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Zárate, E., 1990. *Breve Caracterización de un Evento ENSO en Costa Rica y Acciones de Pronóstico durante la Epoca Lluviosa del Pacífico de 1990*. Artículo presentado en la Conferencia Técnica sobre El Niño y sus implicaciones climáticas, 4-8 diciembre, Montevideo, Uruguay.