

ASPECTOS GENERALES DEL CLIMA EN EL ALTIPLANO SUDAMERICANO

PATRICIO ACEITUNO

DEPARTAMENTO DE GEOFISICA, FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS,
UNIVERSIDAD DE CHILE
CASILLA 2777 - SANTIAGO - CHILE

RESUMEN

Se describen las principales características del clima en el Altiplano sudamericano. Los efectos de la altura determinan fuertemente las condiciones climáticas de esta región. En la superficie, éstas se caracterizan por niveles bajos de presión atmosférica (aproximadamente 620 hPa a 4.000 m s.n.m.), una densidad del aire considerablemente inferior al valor correspondiente a nivel del mar y niveles reducidos de humedad atmosférica. Además, la temperatura del aire es relativamente baja y su ciclo diario muestra una considerable amplitud como resultado del fuerte calentamiento diurno asociado a la alta radiación solar y de la considerable pérdida radiativa nocturna desde la superficie. La precipitación, que muestra un marcado carácter episódico, se concentra durante el verano austral (Diciembre-Marzo), cuando la circulación atmosférica regional favorece la advección de vapor de agua desde la cuenca amazónica. Los eventos de precipitación se asocian en su mayoría a tormentas locales de origen convectivo que se desarrollan durante la tarde, como resultado del fuerte calentamiento radiativo de la superficie.

ABSTRACT

The most relevant characteristics of climate in the South American Altiplano are described. Topographic effects associated with the high elevation of this region explain most of its climatic conditions. At the surface, these conditions are characterized by low levels of atmospheric pressure (around 620 hPa at 4.000 m a.s.l), air density considerably lower than the corresponding value at sea level, and reduced atmospheric humidity. Moreover, air temperature is relatively low and its daily cycle has a large amplitude, resulting from the surface heating associated with strong solar radiation and the intense radiative cooling during the night. Rainfall concentrates during the austral summer (December-March), when the regional atmospheric circulation favors advection of water vapor from the Amazon basin. Rainfall episodes occur mostly in association with local convective thunderstorms which develop in the afternoon as a result of the intense surface heating by solar radiation.

INTRODUCCION

El sector de tierras altas de América del Sur, denominado Altiplano, se localiza en los Andes centrales, entre 15° y 21°S, aproximadamente. Su elevación sobre el nivel del mar, cercana a 4.000 m, condiciona la existencia de características climáticas únicas en el continente, las cuales sólo tienen un equivalente en las tierras altas del Tíbet.

Se presenta aquí una revisión de los aspectos más relevantes del clima en esta región del continente. Teniendo en cuenta la importancia de la precipitación en el Altiplano como fuente del recurso hídrico para la región árida del sur de Perú y norte de Chile, se analiza con particular énfasis las características del régimen pluviométrico y los mecanismos que explican su variabilidad.

La discusión que sigue se refiere a condiciones climáticas en lugares bien expuestos del Altiplano con altitudes cercanas a 4.000 m sobre el nivel del mar. Efectos locales asociados al relieve o a la presencia de lagos o salares determinan la existencia de condiciones locales significativamente diferentes de las que más adelante se describen.

PRESION ATMOSFERICA Y DENSIDAD DEL AIRE

La presión atmosférica en el Altiplano, a 4.000 m s.n.m., es aproximadamente un 40% inferior al valor observado a nivel del mar. La densidad del aire también disminuye por efecto de la altura. Así, considerando pares de valores presión-temperatura de (1.010 hPa, 20°C) y (630 hPa, 10° C) como representativos de las condiciones medias a nivel del mar y sobre el Altiplano, se determina que la densidad del aire en esta última región es un 35% inferior al valor a nivel del mar, el cual es cercano a 1.2 kg/m³. En particular, la menor concentración de oxígeno atmosférico en el Altiplano es causa de diversos efectos fisiológicos en personas y animales no adaptados a este ambiente.

PROCESOS RADIATIVOS

El régimen anual de la radiación solar disponible a nivel de superficie en el Altiplano está condicionado por factores geográficos y meteorológicos, entre los cuales destacan su localización en el trópico, su elevación y el régimen de nubosidad.

La cercanía del Altiplano al Ecuador implica que la amplitud del ciclo anual de la radiación solar es relativamente moderada. Así, en toda la región altiplánica, la radiación diaria por unidad de área horizontal en el tope de la atmósfera en diciembre es sólo 1.7 veces mayor que el valor homólogo en junio. Como referencia se indica que en latitudes de 30°, 40° y 50°S este mismo cociente es aproximadamente 2.3, 3.5, y 7.0, respectivamente.

La nubosidad relativamente más abundante durante el verano austral (diciembre-marzo) determina que en la mayor parte del Altiplano la radiación global mensual a nivel de superficie alcance el máximo anual hacia fines de la primavera austral (noviembre).

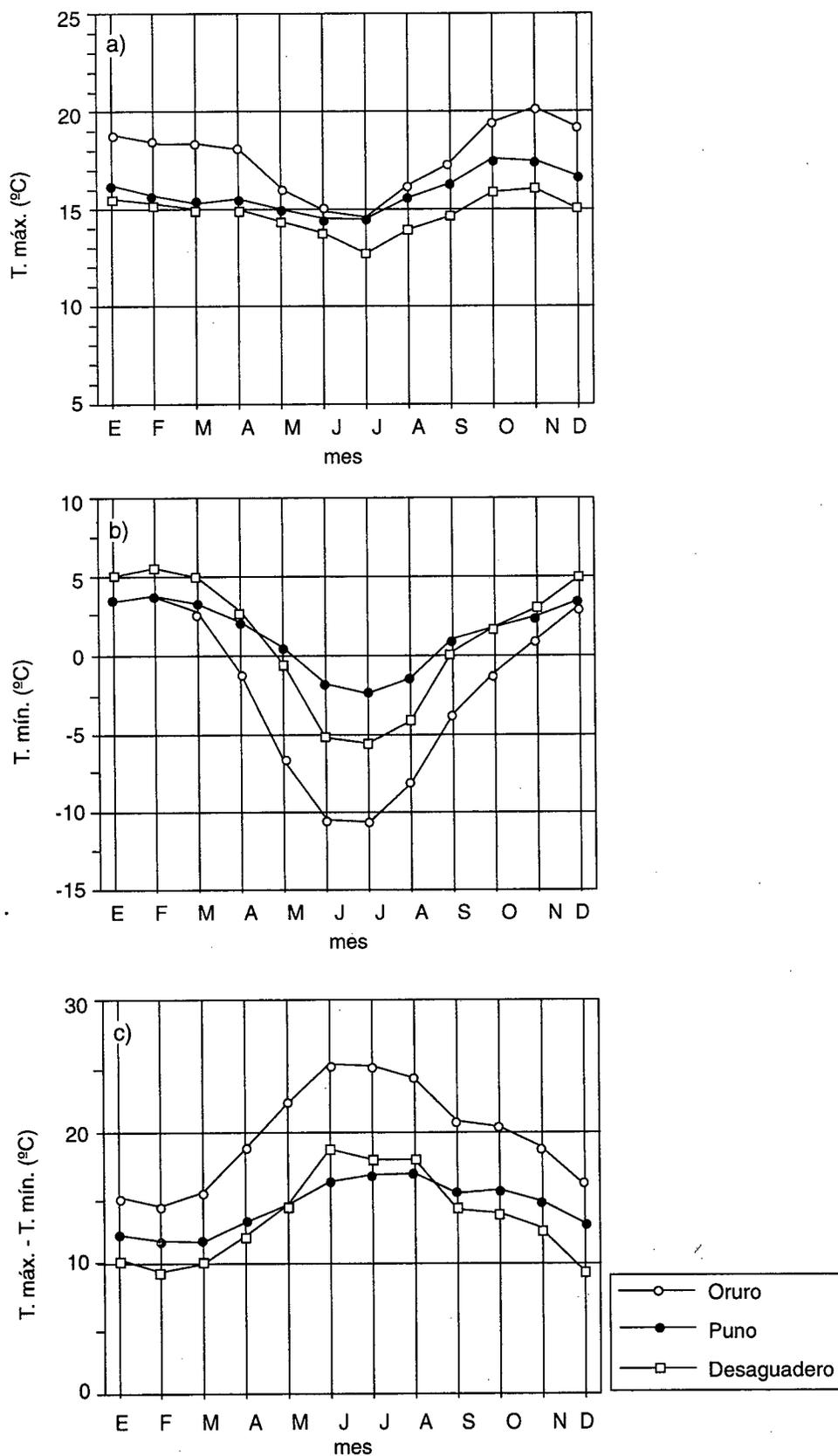


Fig. 1. Ciclos anuales de temperatura máxima diaria (a), temperatura mínima diaria (b) y amplitud térmica diaria (c) en tres estaciones del Altiplano sudamericano: Puno (15° 50' S, 70° 01' W, 3.852 m), Desaguadero (16° 39' S, 69° 00' W, 3.850 m) y Oruro (17° 58' S, 67° W, 3.708 m).

Debido a la considerable elevación del territorio altiplánico, la atmósfera local tiene un menor espesor óptico total de elementos absorbentes y dispersantes de la radiación solar, lo que contribuye a un aumento relativo de la radiación solar global (directa+difusa). En particular, la menor capacidad de absorción de la radiación solar en la atmósfera sobre el Altiplano se traduce en un aumento relativo de la componente ultravioleta del espectro solar, a nivel de superficie. Mediciones realizadas entre Putre y Arica, indican que la radiación ultravioleta UV-B (305 nm) disminuye desde el Altiplano hacia la costa con una tasa cercana a 4.5% por kilómetro de desnivel tanto en verano como en invierno (Cabrera *et al.*, 1994). Esta estimación, de carácter preliminar, indica que durante días despejados la radiación ultravioleta en la región altiplánica supera en aproximadamente 20% el valor registrado a nivel del mar.

Mediciones del índice de reflexión de la radiación solar global en la superficie (albedo) realizadas en Visviri sobre suelo seco cubierto de tola y en un bofedal indicaron valores cercanos a 18% y 23%, respectivamente (H. Fuenzalida, comunicación personal).

La menor densidad de los gases de efecto invernadero en la atmósfera altiplánica hace que ésta sea más transparente a los flujos radiativos en el rango infrarrojo del espectro. Esto determina una menor contra-radiación atmosférica y un acelerado enfriamiento nocturno de la superficie.

TEMPERATURA

En el Altiplano la temperatura media junto a la superficie es relativamente baja, lo que constituye un importante factor limitante en el desarrollo de la vegetación. En la atmósfera libre la temperatura disminuye con la altura a una tasa cercana a 6.5 °C/km. En la pendiente andina el gradiente es menor, como resultado de la transferencia de energía desde la superficie. Así, por ejemplo, en el sector andino meridional de Perú por encima de 1000 m sobre el nivel del mar, la temperatura media disminuye aproximadamente 5.5°C por kilómetro (Fräre *et al.*, 1975).

Los ciclos anuales de las temperaturas extremas diarias y de la diferencia entre ambas (Fig. 1) reflejan la importancia del forzamiento radiativo del clima altiplánico. Así, la condición tropical de la región y el aumento de la nubosidad durante el verano austral justifican la pequeña amplitud del ciclo anual de temperatura máxima (Fig. 1a) cuyo valor más alto se presenta a fines de la primavera (noviembre) en asociación con el máximo anual de radiación solar global.

La temperatura mínima diaria presenta un ciclo anual de mayor amplitud (Fig. 1b) el cual está condicionado en parte por la fluctuación a lo largo del año de la pérdida radiativa nocturna desde la superficie. Esta se atenúa durante el verano debido a la intensificación del efecto invernadero en la atmósfera provocado por el aumento de la nubosidad y de la concentración de vapor de agua.

El régimen descrito para las temperaturas extremas diarias condiciona la existencia de una variación anual bien definida en la amplitud térmica diaria (Fig. 1c), la cual es máxima durante el invierno y mínima a fines del verano austral (febrero).

VIENTO

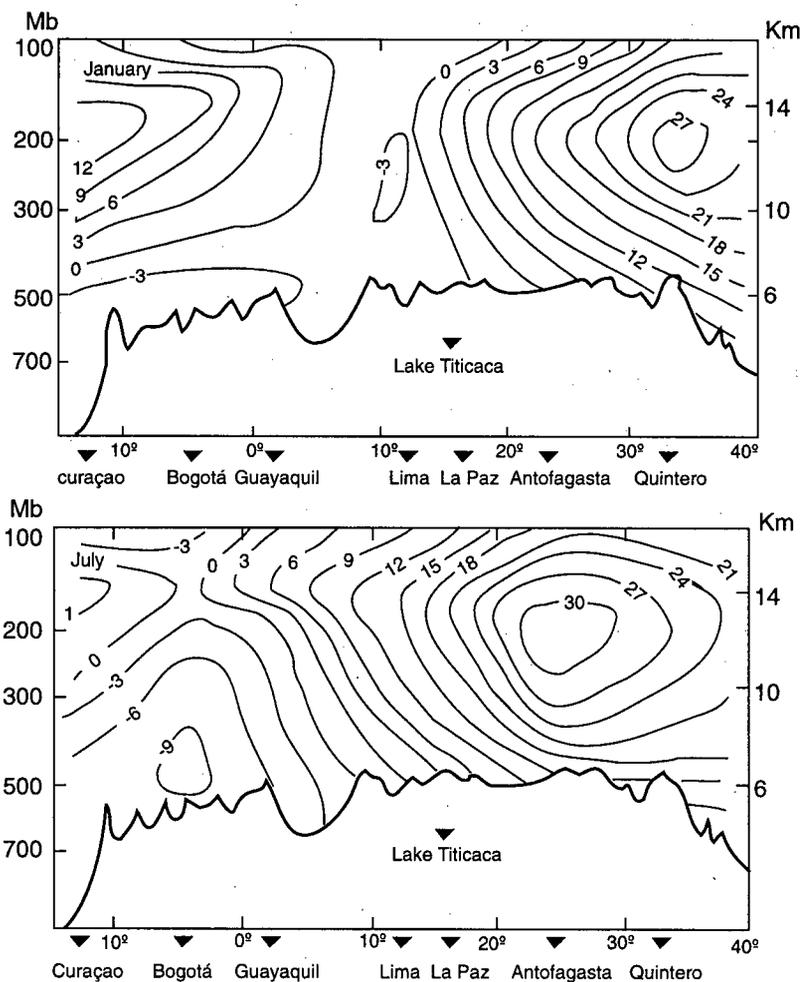
La Fig. 2 muestra un perfil de la componente zonal (este-oeste) del viento a lo largo de la costa del Pacífico durante enero y julio. Durante el invierno austral (julio), cuando la corriente en chorro subtropical se encuentra en su posición más septentrional, la región altiplánica queda bajo la influencia de los vientos relativamente secos del oeste. Durante el verano, la corriente en chorro es relativamente más débil y se desplaza hacia el sur, de modo que el límite entre el sector con predominio de un flujo con componente del este y la zona de los oeste en latitudes más altas se localiza sobre la región altiplánica.

El activo desarrollo de nubosidad convectiva en la parte sur de la cuenca amazónica y sobre el Altiplano, durante el verano (Fig. 4a), condiciona el establecimiento de una circulación anticiclónica en la tropósfera superior, alrededor de un centro de alta presión denominado alta de Bolivia (Gutman y Schwerdtfeger, 1965; Virji, 1981) cuyo centro se localiza sobre el territorio altiplánico.

El régimen de viento cerca de la superficie está fuertemente condicionado por la topografía local. El desarrollo de brisas de valle-montaña y aquellas asociadas a la presencia de lagos y salares generan circulaciones locales que pueden apartarse considerablemente del flujo atmosférico de gran escala en la región.

HUMEDAD ATMOSFERICA Y PRECIPITACION

Las masas de aire que llegan a la región altiplánica tienen en general un contenido relativamente bajo de humedad, debido a su origen en niveles elevados. Por otra parte, el ambiente frío predominante, por efecto de la altura, implica una menor capacidad de retención de vapor de agua. La humedad absoluta es considerablemente menor durante el invierno austral cuando predomina sobre el Altiplano un flujo del oeste desde el dominio del anticiclón del Pacífico suroriental. Durante la temporada de lluvias, en el verano austral, los niveles de humedad absoluta y relativa aumentan como resultado de la advección de masas de aire desde la cuenca amazónica. Esta condición del ciclo anual de la humedad del aire en el Altiplano se advierte parcialmente en



(Ref. Kessler, 1974)

Fig. 2. Componente zonal del viento (E-W) a lo largo de la costa oeste de América del Sur, en m/s, durante enero y julio (adaptado de Kessler, 1974). Valores positivos indican viento del oeste, y negativos, viento del este.

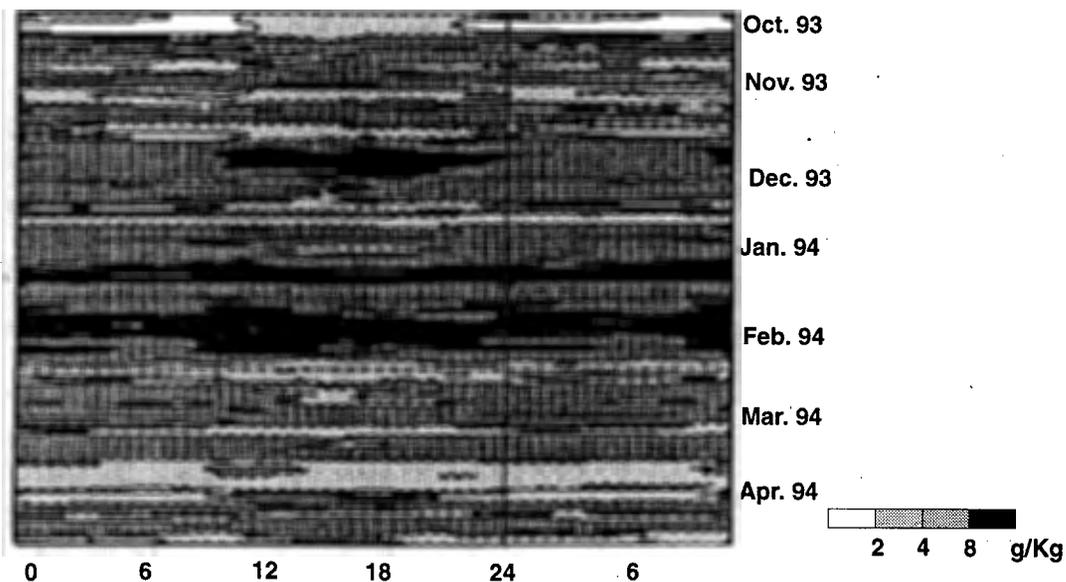


Fig. 3. Valores medios horarios de razón de mezcla en Visviri (17.5° S, 69.5° W, 4.070 m s.n.m.) entre octubre de 1993 y abril de 1994.

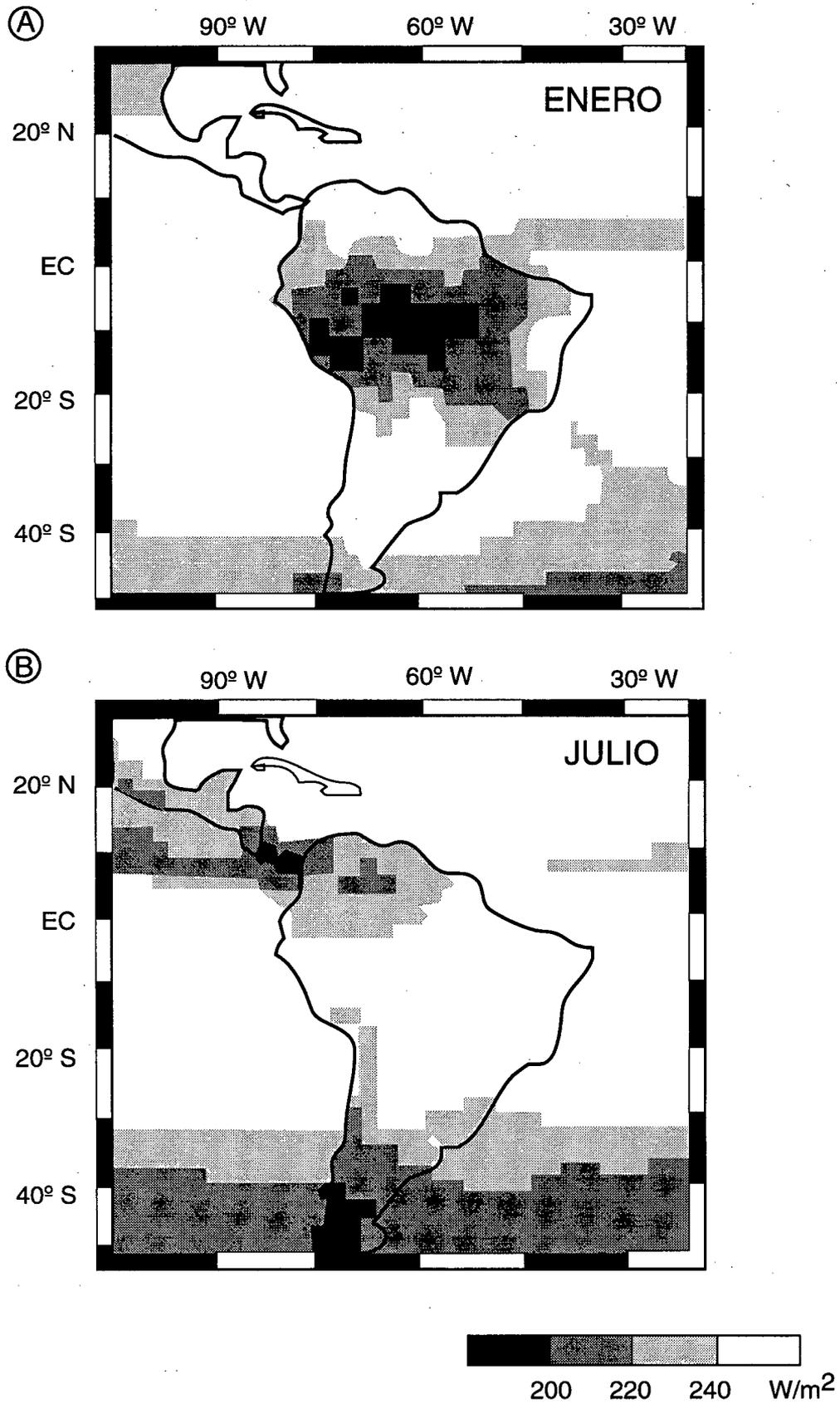


Fig. 4. Radiación infrarroja emergente durante enero y julio (fuente de datos NMC - CAC). Los valores mínimos de radiación en el trópico se asocian a las bajas temperatura en la parte superior de las nubes cumuliformes.

la Fig. 3, que muestra la evolución de la razón de mezcla (razón entre densidad del vapor de agua y densidad del aire seco) en Visviri entre octubre de 1993 y abril de 1994. La razón de mezcla aumentó desde valores inferiores a 2 gr/Kg en octubre hasta máximos del orden de 9 gr/kg en los periodos más húmedos. Se advierte, además, una significativa variabilidad intra-estacional del contenido de vapor de agua en la atmósfera.

El régimen pluviométrico en el Altiplano se relaciona con el ciclo anual de la nubosidad convectiva en la región tropical del continente. Así, las lluvias se concentran en el verano austral (diciembre-marzo) cuando el núcleo de nubosidad convectiva alcanza su máxima intensidad y extensión hacia el sur (Fig. 4a). Durante el resto del año, cuando la actividad convectiva se desplaza hacia la región noroccidental del continente (Fig. 4b), la lluvia es escasa y los raros eventos de precipitación se asocian a perturbaciones atmosféricas provenientes de latitudes medias.

La distribución espacial de la precipitación en el Altiplano no es homogénea. El marcado gradiente pluviométrico en la dirección N-S, con montos progresivamente decrecientes hacia el sur, se relaciona con el esquema de circulación zonal promedio durante el verano (Fig. 1a), donde se aprecia que la parte norte del Altiplano queda en promedio bajo la influencia del flujo de aire húmedo desde el este. En el sector sur, en cambio los procesos de advección de masas de aire desde la cuenca amazónica son menos frecuentes, y por lo tanto la precipitación es menor.

La ocurrencia de precipitación en el Altiplano tiene un marcado ciclo diario (Fuenzalida y Rutllant, 1987; Aceituno y Montecinos, 1993), lo cual pone en evidencia la importancia del forzamiento radiativo de la misma. La lluvia se presenta generalmente durante horas de la tarde en la forma de intensos chubascos asociados a un rápido desarrollo de nubosidad convectiva. El análisis de la variabilidad interdiaria de la precipitación durante la temporada de lluvias muestra su naturaleza episódica (Aceituno y Montecinos, 1993), con alternancia de periodos húmedos y secos. Esta estructura temporal, que también se advierte en la Fig. 3, se asocia con fluctuaciones en la posición e intensidad de la alta de Bolivia. En particular, se ha determinado que durante los periodos húmedos en el sector norte del Altiplano chileno, la alta de Bolivia se presenta anormalmente intensa y desplazada hacia el sur (Fig. 5), en relación a su posición durante los periodos secos (Aceituno y Montecinos, 1993).

En cuanto a la variabilidad de la precipitación en escalas de tiempo mayor, los registros hidrometeorológicos más extensos (precipitación en La Paz y nivel del Lago Titicaca en Puno) no presentan evidencias de una tendencia secular bien definida,

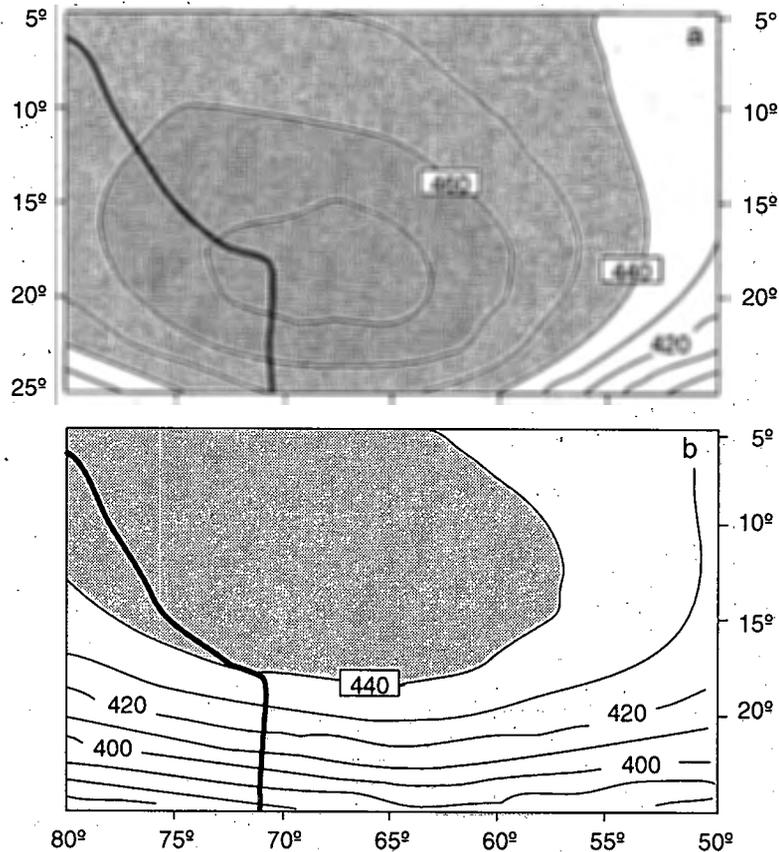


Fig. 5. Altura geopotencial de 200 hPa durante eventos de precipitación (a) y durante periodos secos (b) en la parte norte del Altiplano chileno. Las alturas geopotenciales están en expresadas como la diferencia, en metros, sobre 12.000 m (adaptado de Aceituno y Montecinos, 1993).

aunque sí muestran una fuerte variabilidad inter-anual e inter-decadal. Por otra parte, diversos estudios han establecido que durante los eventos El Niño o durante la fase negativa de la Oscilación del Sur la precipitación en el Altiplano suele ser deficitaria (Thompson *et al.*, 1984; Francou y Pizarro, 1985), aunque esta asociación parece ser menos significativa que en otros sectores del continente (Aceituno, 1988).

COMENTARIOS FINALES

Debido a la gran elevación y extensión del Altiplano sudamericano sus condiciones climáticas son únicas en el continente y se caracterizan por bajas temperaturas, valores reducidos de presión, contenido de vapor de agua y oxígeno atmosférico, una mayor radiación solar global a nivel de superficie, incluyendo la componente ultravioleta, y una menor concentración de gases de efecto invernadero. Esta condición climática particular hace del Altiplano un valioso laboratorio natural para estudiar formas de adaptación de la vegetación y de la vida animal a los ambientes de altura.

El vapor de agua que genera la precipitación en el Altiplano proviene principalmente desde la cuenca amazónica. La lluvia, de tipo episódico y con un marcado ciclo diario en su ocurrencia, se presenta preferentemente en horas de la tarde durante el verano austral, en asociación con un flujo del este en niveles troposféricos cercanos a la superficie.

El sostenido crecimiento de las ciudades en la franja árida costera adyacente al Altiplano, así como el aumento de la actividad minera en esta región, imponen una fuerte presión sobre el escaso recurso hídrico disponible, el cual proviene en forma casi exclusiva de la precipitación en el Altiplano y del almacenamiento subterráneo (recursos de agua fósil). Teniendo en cuenta el factor limitante que esta situación representa para el desarrollo de esta región, es importante avanzar en el conocimiento de los mecanismos que determinan la variabilidad del régimen pluviométrico en el Altiplano. Esta tarea es particularmente necesaria como un antecedente en el análisis del impacto local de un eventual cambio climático global, así como de los posibles efectos sobre el régimen pluviométrico altiplánico, del proceso de deforestación en la cuenca amazónica.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a Humberto Fuenzalida y Aldo Montecinos por sus valiosos comentarios y sugerencias al manuscrito original. Algunos de los resultados analizados en este trabajo provienen de investigaciones financiadas por los proyectos IPGH-93.26, Fondecyt 90-1245 y Fondecyt 1930789.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Aceituno, P., 1988. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector: Part 1: surface climate. *Mon. Wea. Rev.*, 116, 505-524.

Aceituno, P. y A. Montecinos, 1993. Circulation anomalies associated with wet and dry periods in the South American Altiplano. pp. 330331 en *Preprints: Fourth Int. Conf. on S. Hemisphere Meteor. and Oceanography*. Hobart - Australia, 22 march - 2 abril, 1993.

Cabrera, S., S. Bozzo y H. Fuenzalida, 1994. Primeras mediciones de radiación UV en Chile con resolución espectral media. Presentado al *Journal of Photochemistry and Photobiology*.

Francou, B. y L. Pizarro, 1985. El Niño y la Sequía en los altos Andes centrales (Perú y Bolivia). *Bull. Inst. Fr. Et. And.*, Vol. XIV, Nº1 1-18.

Frère, M., J.Q. Rijks y J. Rea, 1975. Estudio agroclimatológico de la zona andina. Informe Técnico. Proyecto interinstitucional FAO/UNESCO/OMM en Agroclimatología. 375 p.

Fuenzalida, H. y J. Rutllant, 1987. Origen del vapor de agua que precipita en el Altiplano de Chile. pp. 6.3.1 a 6.3.4 en *Anales de II Congreso Interamericano de Meteorología*. Buenos Aires - Argentina. 30 Noviembre - 4 Diciembre 1987.

Gutman, G. y W.S. Schwerdtfeger, 1965. The role of latent and sensible heat for the development of a high pressure system over the subtropical Andes, in summer. *Meteor. Rundsch.*, 17, 1-7.

Kessler, A., 1974. Atmospheric circulation anomalies and level fluctuations of lake Titicaca. *Bonner Met. Abh.* 17., 361-372.

Thompson, L.G., E. Mosley-Thompson y B. Morales, 1984. El Niño - Southern Oscillation events recorded in stratigraphy of the tropical Quelccaya ice cap, Perú. *Science*, 226, 50-53.

Virji, H., 1981. A preliminary study on summertime tropospheric circulation patterns over South America estimated from clouds winds. *Mon. Wea. Rev.*, 109, 599 - 612.