

Regímenes climáticos del altiplano sur de Bolivia: una región afectada por la desertificación

Climatic regimes of the Bolivian Southern High Plateau: A region affected by desertification

Andressen L. Rigoberto*, Monasterio Maximina* y Terceros** Luis F.

Recibido: enero, 2006 / Aceptado: septiembre, 2006

Resumen

El altiplano sur de Bolivia se localiza al sudoeste del país, abarca una extensión de 73.983 km², y se caracteriza por la presencia de grandes salares y pampas desérticas, con precipitaciones de 100 mm anuales o menos, que se presentan de manera errática, y temperaturas frías debido a la altitud. Las condiciones climáticas extremas hacen que esta región sea la más despoblada de Bolivia. Con base en estudios paleoclimáticos se ha podido establecer que el clima de esta región casi siempre ha sido seco, con leves oscilaciones de mayor humedad. En el presente trabajo se analizan los regímenes climáticos y su relación con el proceso de desertificación, utilizando los registros históricos climatológicos de nueve estaciones del SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología), que tienen más de diez años de datos y las observaciones efectuadas en el trabajo de campo realizado en el marco de la Asesoría Técnica patrocinada por el Programa MAB-UNESCO. También se consideran aspectos importantes de la circulación atmosférica a gran escala, así como la influencia de la cordillera andina como barrera fisiográfica. Igualmente, se discuten la precipitación, evaporación y balance hídrico, junto con los aspectos de radiación, temperatura y vientos. Finalmente, se hace una evaluación de las precipitaciones y su posible relación con los eventos Niño y Niña.

Palabras clave: clima de Bolivia; desertificación; Niño-Oscilación Sur.

Abstract

The Bolivian Southern High Plateau (Altiplano Sur de Bolivia) is located in the southwestern part of Bolivia. It has a total area of 73,983 Km², and it is characterized by the presence of large 'salar' (dry salt-lakes) and arid pampas with rainfall averages of 100 mm/year that present a temporal erratic behaviour, and low temperatures due to the altitude. Because of the predominant dry conditions, this region is one of the most desolated areas in Bolivia. Based on paleoclimatic studies carried out by various authors, it is believed that this region has been dry for a very long period, interrupted by sporadic short humid intervals. This paper attempts to study the climatic patterns and their relationships to the ongoing desertification process, and it is based on climatic data from the SENAMHI (Servicio Nacional de

* Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE), Mérida-Venezuela 5101-A, e-mail: randss@ula.ve maximina@ula.ve

** Universidad de Los Andes, Postgrado en Ecología Tropical, (CIELAT) ICAE, (Actualmente: Asociación Ecológica de Oriente, Santa Cruz-Bolivia).

Meteorología e Hidrología) stations, with more than 10-year record. It is also based on the observations gathered in the fieldwork, conducted in the Technical Consultancy framework sponsored by the MAB-UNESCO Programme. Important aspects of the large-scale atmospheric circulation are considered, as well as the role of the Andes as an orographic barrier. Aspects of the rainfall, evaporation, water balance, radiation, temperature and winds are also discussed. A preliminary assessment of the El Niño and La Niña events and their possible relations to precipitation is presented.

Key words: Bolivian climate; desertification; El Niño-Southern Oscillation.

Introducción

La desertificación es considerada como uno de los problemas ambientales más serios a nivel mundial y que, además, tiene importancia científica, política, e incluso de interés público. (Thomas & Middleton, 1994). Según la Convención de las Naciones Unidas para la Desertificación (UNEP, 1994), ésta es considerada como el resultado de una serie de procesos naturales y antropogénicos, que conduce a una gradual degradación ambiental o pérdida de la productividad biológica de la tierra.

A pesar de que el interés por el problema de la desertificación no es nuevo, es en la década de los años 1970 cuando se conceptualiza y se le considera de proporciones globales, iniciándose una amplia discusión acerca del mismo y de las maneras de enfrentarlo.

En 1985, las Naciones Unidas crearon una oficina especializada para la desertificación (Desertification Control Programme Activity Centre DC/PAC), que se encargaría del Plan de Acción de Lucha contra la Desertificación (Plan hoy Acción to Combat Desertification PACD).

A finales de los años 80, el tema de los Cambios Climáticos Globales pasa a

ocupar un primer plano entre los asuntos ambientales. En 1988 se establece el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), y para el Informe Evaluativo de 1995 ya se incluye una sección sobre Degradación de Tierras y Desertificación (IPCC, 1996).

Geográficamente, las zonas desertificadas o en proceso de desertificación se encuentran en las regiones áridas, semiáridas y en algunas regiones subhúmedas.

En Bolivia, la desertificación se manifiesta en forma de procesos de degradación de tierras en las regiones áridas, semiáridas y subhúmedas secas, de una amplia región que abarca casi la mitad meridional del país, subregiones del altiplano y valles y Chaco Boliviano (Liebermann y Qayum, 1994). El área afectada por este problema alcanza aproximadamente a 450.000 Km² (41 % de la superficie total del país) y se extiende desde los 14° 20' a los 22° 53' de latitud sur, y desde los 57° 40' hasta los 69° 38' de longitud oeste, comprendiendo el 100 % de los departamentos de Oruro, Potosí, Chuquisaca y Tarija, el 32 % del departamento La Paz, 46 % de Cochabamba y 33 % de Santa Cruz (MDSMA, 1996).

La pérdida de tierras productivas se

estima en 1.800.000 tn/año, lo que compromete la productividad de 1.500.000 ha (MDSMA, 1996). La degradación de la vegetación alcanza una tasa anual de 127.000 ha a nivel nacional (PAF-BOL, 1995), de la cual por lo menos un 10 % corresponde a las regiones afectadas por la desertificación. En esas mismas regiones predomina la pobreza, ya que de cada 10 habitantes 6 son pobres, de los que 3 corresponden a pobreza extrema (MDSMA, 1996).

Región del altiplano sur de Bolivia

La gran cordillera de los Andes atraviesa Bolivia con sus dos ramales, la cordillera Occidental o región volcánica y la cordillera Oriental, que encierran el altiplano boliviano y vuelven a unirse al sur formando un gran macizo montañoso (Montes de Oca, 1989). El altiplano boliviano ocupa una superficie de 178.662 km² (16.4 % del territorio nacional); no es una llanura plana sino que está surcado por varias serranías. El altiplano se divide en tres subregiones: el altiplano norte con 13.600 km², el central con 91.079 km² y el sur con 73.983 km². Esta última región, objeto del presente estudio, se encuentra al suroeste del país, desde los 19° hasta los 21° 40' de latitud sur y desde 66° hasta los 69° de longitud oeste. El altiplano sur constituye una unidad ecológica, con particularidades físico-ambientales propias, de origen volcánico y relicto de un antiguo mar (Figura 1).

La baja precipitación constituye la diferencia más importante entre esta región y el altiplano central y norte. A su vez, la región conforma una cuenca hidrográfica

cerrada que drena sus aportes hídricos hacia el Salar de Uyuni (en el período de escasas lluvias) y la presencia de la napa freática se estima en una profundidad de 2 a 8 m (Claire-Pereira y Asociados, 1991).

Desde el punto de vista agrícola, varios rubros se cosechan en la región. La quinua (*Chenopodium quinoa*) es de fundamental importancia, ya que esta planta se adapta bien a las condiciones extremas de la región. Otros cultivos incluyen papa, haba y cebada. La actividad ganadera se remonta a la época precolonial, y en la actualidad está constituida por llamas, llama-ovejas y ovejas traídas por los conquistadores. El pastoreo es de tipo abierto o libre en el caso de las llamas y conducido o vigilado en el caso de las ovejas. Hay un manejo de las áreas de pastoreo durante el año, que está en función del ciclo de los cultivos, del clima y de la disponibilidad del agua (Monasterio y Andressen, 1996; Terceros, 1997).

El clima juega un papel muy importante en los procesos de desertificación de esta región, y es objeto del presente trabajo hacer una breve referencia a los cambios climáticos pretéritos y discutir el rol que desempeña el clima actual.

Causas e indicadores de la desertificación

La desertificación es causada por dos grupos de factores: las fuerzas naturales y los factores humanos. Las fuerzas naturales tienen que ver, en gran medida, con las condiciones climáticas, entre ellas las se-

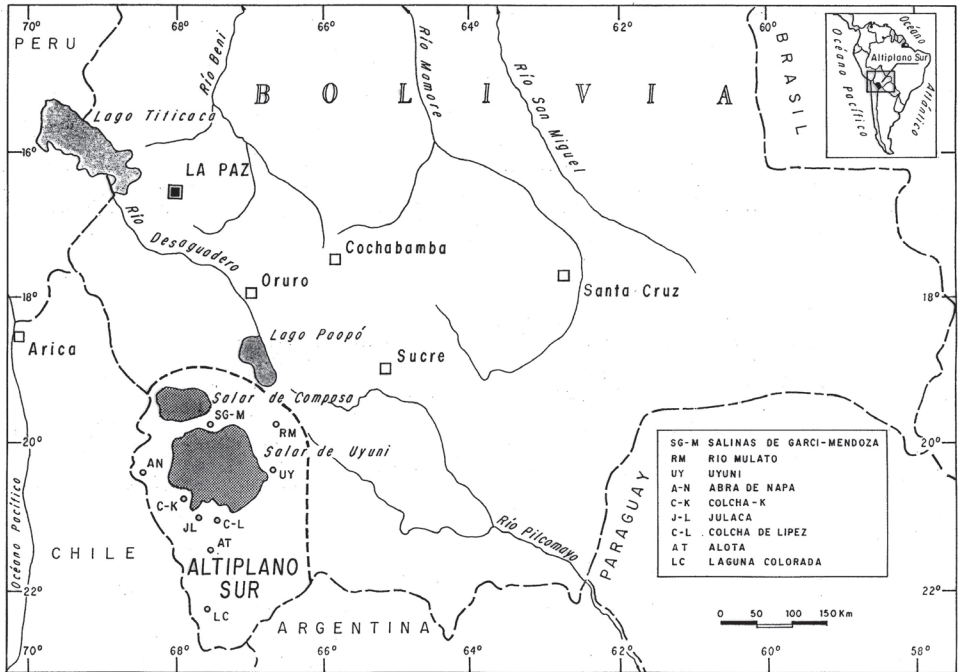


Figura 1. Bolivia y la región del altiplano sur (Recuadro Interno: Lista de Estaciones Climatológicas)

quías persistentes y la aridez. La sequía es definida como la escasez de agua causada por el desbalance entre la precipitación y la evaporación o evapotranspiración. La aridez, en cambio, se define en términos de una precipitación media o en términos de baja disponibilidad de agua que, ignorando la posibilidad de un cambio climático, sea la característica climática permanente de una región (WMO, 1975).

La sequía es una característica recurrente del clima que se presenta en casi todos los tipos de clima y su ocurrencia es temporal. La aridez, en cambio, es una característica permanente de aquellas regiones en las que la precipitación es muy baja o, incluso, llega a ser insignificante.

La desertificación es considerada

como una degradación de los ecosistemas y la ocurrencia de un ambiente desértico en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas (WMO, 1994). En este caso, la degradación producida es entendida como el resultado de la excesiva actividad humana, acompañada de sequías.

Los principales factores que se citan como causas de la desertificación tienen que ver con actividades humanas que se efectúan en un marco climático desfavorable. Entre estas causas están:

- a) el manejo inadecuado de los recursos naturales (suelo, agua, flora y fauna), y
- b) la presión excesiva en el uso de la tierra (el sobrepastoreo, la labranza de tierras marginales y el manejo inadecuado)

cuado del riego, entre otros aspectos).

La mayor parte de estos factores están presentes en el altiplano sur.

Entre los métodos para estudiar la desertificación se incluye la evaluación de los *indicadores de desertificación*, que tienen la ventaja de proveer información sintética y simple acerca del estado y tendencia de procesos complejos (Rubio & Bochet, 1998). En el altiplano sur se han podido evidenciar, en el estudio de campo, los siguientes indicadores del proceso de desertificación (Monasterio y Andresen, 1996; Terceros, 1997):

- degradación continua de la vegetación,
- erosión hídrica y eólica,
- formación de dunas o su reactivación,
- desecación de los perfiles de suelo,
- disminución del nivel de las aguas subterráneas,
- salinización de los suelos,
- presencia de carcavamiento y 'badlands',
- deterioro del status de los nutrientes del suelo,
- disminución de la productividad biológica del suelo,
- reducción del rendimiento de las cosechas,
- perjuicios a los cultivos por el viento,
- ablación de la capa superficial del suelo, y
- condiciones de vida más duras.

El clima del altiplano sur

El clima del altiplano sur está determinado por su posición geográfica (19° a 21° 40' de latitud sur y 66° a 69°, longitud

oeste), en plena faja subtropical del hemisferio sur. El relieve juega un papel muy importante, ya que la cordillera de los Andes se levanta, a ambos lados del altiplano, como una barrera fisiográfica de más de 4.000 m de altitud, con cumbrones que se aproximan a los 6.000 m en la parte occidental. Según Ortlieb (1995a), esta combinación de factores fisiográficos con los atmosféricos explicaría la aridez del altiplano, ya que la cordillera Real o cadena Oriental de los Andes, que avanza hacia el norte a través de Bolivia, actúa como barrera para los flujos de aire húmedo, provenientes del océano Atlántico y cuenca Amazónica. Además, la región altiplánica se halla próxima a la costa árida del norte de Chile.

Secuencia paleoclimática: los últimos 10.000 años

Los cambios climáticos ocurridos en el pasado reciente han sido estudiados por varios autores (Martin *et al.*, 1995; Argollo y Mourguiart, 1995; Graf, 1995; Ortlieb, 1995a, 1995b; Mörner, 1992). De acuerdo con estos estudios se puede establecer que, en general, el clima del altiplano fue seco, aunque con leves oscilaciones de relativa humedad, con duraciones más o menos largas.

En el altiplano sur, el Holoceno está caracterizado por la desecación parcial de los lagos (Uyuni, Coipasa y Poopó), mientras que hacia el norte la evolución paleobatimétrica del lago Titicaca ha sido muy compleja. El nivel actual del lago Titicaca se establece en el período 2.000-1.000 años AP (Liebermann y Qayum, 1994).

Por su parte, las lluvias y los caudales superficiales han evolucionado durante los últimos 10.000 años AP, entre períodos de mayor aridez y períodos de mayores precipitaciones con menor duración que los anteriores, que produjeron mayores caudales y, por lo tanto, mayor erosión. Estas fases de mayor erosión se sitúan entre 7.000 y 6.000 años AP y luego de 1.500 ó 500 años AP (Libermann y Qayum, 1994).

Reconstrucciones paleoclimáticas de los últimos 7.000 años muestran que algunas perturbaciones del régimen de lluvias, comparables a las que actualmente se registran en eventos ENOS fuertes, se produjeron repetidas veces (Martin *et al.*, 1995). Graf (1995) sostiene que la desertización de esta región pudo haberse iniciado en el Holoceno medio (Figura 2).

Recientemente, a partir de unos 500 a 1.000 años AP, el evento ENOS se hace menos intenso que en períodos anteriores, y este hecho acompaña los procesos de desertización ocurridos desde entonces.

Circulación atmosférica regional

El cuadro de la circulación atmosférica regional del altiplano sur, está dominado por la alta presión subtropical del Pacífico sur, la alta presión subtropical del Atlántico sur, la baja presión continental y la alta presión boliviana. Por el lado oeste, además, las aguas frías de la corriente de Humboldt y los fenómenos de surgencia (upwelling) costeros generan una inversión térmica, en la vertiente andina hacia el Pacífico, que, en general, inhibe los procesos de convección o ascenso orográfico sobre esa vertiente.

Situación de verano (noviembre-marzo): Durante el verano astronómico hay un predominio, sobre el altiplano, de la circulación tropical que favorece los procesos de convección y las precipitaciones, ya que la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) se halla desplazada hacia el sur. Durante este período, el flujo de humedad proviene de la cuenca amazónica y del Chaco. Los vientos del noreste y este, y la anomalía térmica caliente que constituye el altiplano, en esta época del año, favorecen estas penetraciones de aire húmedo de la cuenca amazónica que ocasionan precipitaciones de carácter tempestuoso, cada vez más episódicas, a medida que nos desplazamos hacia el sur (Ronchail, 1989, citado por Terceros, 1997; Hardy *et al.*, 1998).

En la estación del verano austral, la alta presión del Pacífico sur migra de 32° a 36° S y de 92° a 99° W (Hastenrath, 1991); es decir, su influencia se aleja del altiplano. Por su lado, la alta presión del Atlántico sur se ubica hacia los 33° S y 50° O. La circulación troposférica media (en el nivel 220 hPa) se halla controlada por la alta presión boliviana, que para enero-febrero se sitúa cerca de 15° S y entre 65° y 70° W (Hastenrath, 1991). Dada la altitud del altiplano (alrededor del nivel de presión de 620 hPa), la alta boliviana ejerce una fuerte influencia en esta época del año. Hastenrath (1991) sostiene que el calor sensible y latente asociado con las lluvias tormentosas sobre la elevada superficie caldeada del altiplano es particularmente efectivo, conjuntamente con la expansión de columnas atmosféricas sobre las tierras bajas tropicales. Después

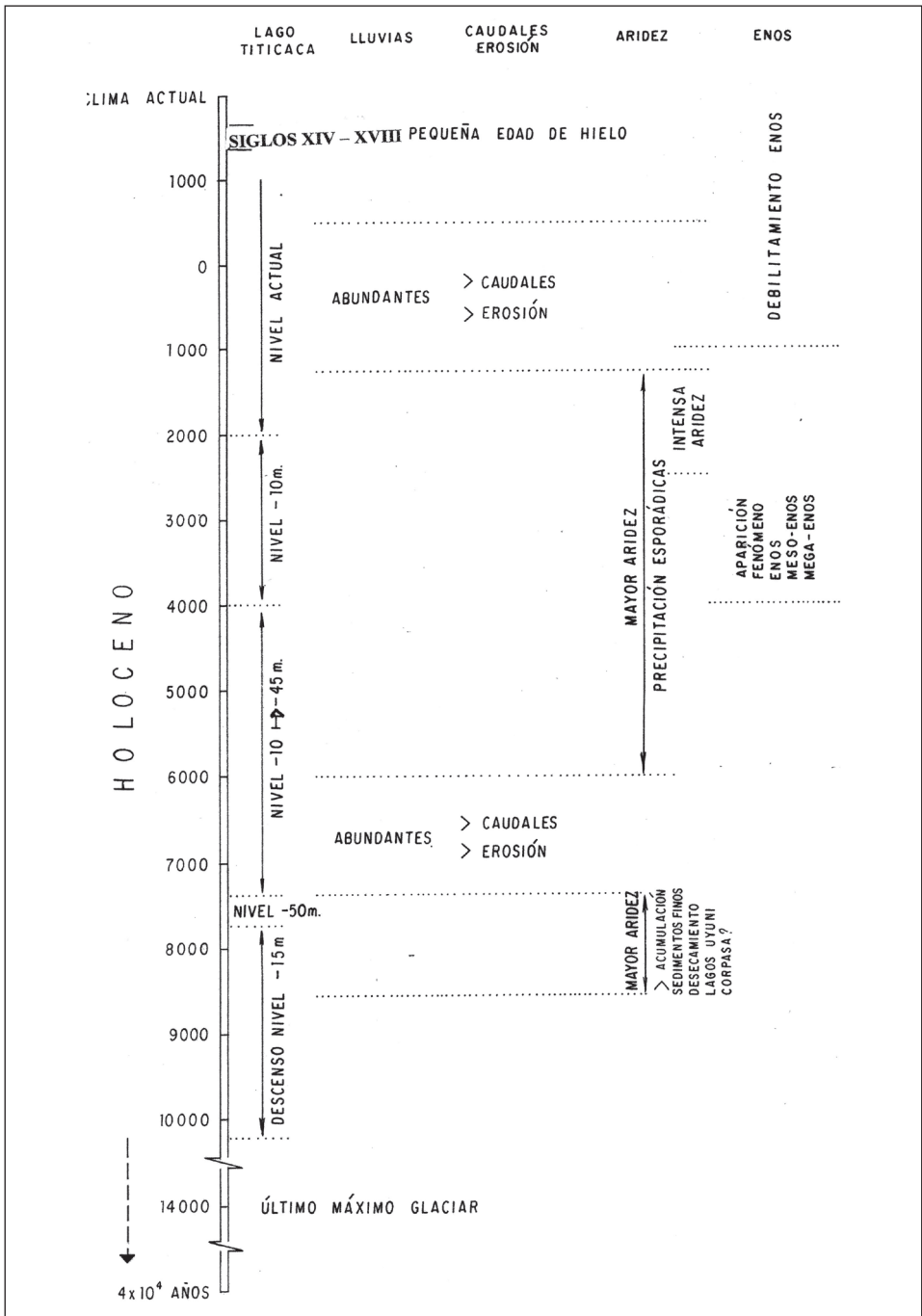


Figura 2. Secuencia paleoclimática en el altiplano boliviano

de marzo, la alta boliviana migra hacia el ecuador y luego se desvanece hacia abril o mayo.

Para el sostenimiento de la convección y la generación de precipitación en el período de verano astronómico, Hardy *et al.* (1998) afirman que la circulación superior debe jugar un papel crucial. Sólo una situación de divergencia en la alta atmósfera con fuertes anomalías del viento del este, proveen las condiciones favorables para la precipitación (Jacobeit, 1992, citado por Hardy *et al.*, 1998).

Situación de invierno (junio-agosto): En contraste con la situación de verano, este período es normalmente seco, aunque interrumpido ocasionalmente por avances de restos de masas de aire polar del Pacífico sur (frentes fríos o vaguadas en la altura), que tienden a producir nevadas (Vuille & Ammann, 1997).

En esta época del año, la ZCIT se desplaza hacia el norte del ecuador geográfico y las altas presiones del Pacífico sur y del Atlántico sur se intensifican. La alta presión del Pacífico sur migra de 27° a 31° S y de 100° a 89° W y la del Atlántico sur se ubica hacia los 28° S (Hastenrath, 1991), posicionándose más cerca del altiplano. Este cuadro impide el ingreso de aire húmedo de la cuenca amazónica hacia el altiplano y durante estos meses predominan los vientos secos del oeste, sólo interrumpidos ocasionalmente por las invasiones extratropicales antes citadas (relictos de frentes fríos y vaguadas en la altura), que producen algunas precipitaciones de nieve de baja intensidad.

Precipitación, evaporación y balance hídrico

Información climatológica básica: Para la caracterización climática del altiplano sur se utilizaron los datos provenientes de nueve estaciones, cuyas características se detallan en el cuadro 1 y cuya ubicación se presenta en el mapa de la figura 1. Las variables climáticas analizadas se presentan en el cuadro 2, junto con los valores anuales.

Precipitación: En el altiplano sur la precipitación anual varía de 270 mm en su sector norte a 60 mm en el sur. El período de lluvias se presenta en los meses de diciembre a marzo, variando también su cantidad de acuerdo a un gradiente latitudinal noreste-suroeste. El mes más lluvioso es enero y los más secos son los comprendidos entre mayo y septiembre (Figura 3).

Los registros pluviométricos de las estaciones muestran grandes amplitudes en la variación de las precipitaciones. Por ejemplo, Calcha de Lipez recibió en 1983, 8.7 mm y al año siguiente (1984), 507 mm (un incremento de más de 5.000 %). El cuadro 3 muestra los valores de precipitación para los años más húmedos y más secos del período de registro de cada estación.

Esta variabilidad interanual es influenciada por los eventos ENOS. Un año Niño como 1983, que fue el más deficitario en varias localidades (Río Mulatos, Julaca y Calcha de Lipez), fue seguido, en general, por un año más húmedo (1984).

En la estación de invierno astronómico, una parte de la precipitación ocurre

Cuadro 1. Estaciones climatológicas del altiplano sur-Bolivia

ESTACIÓN	TIPO	LAT. S.	LON. W.	ALT. m	AÑOS REGISTRO	ECORREGIÓN*
Salinas Garcí-Mendoza	Ordinaria	19° 38´	67° 41´	3680	1947-85	Puna seca
Río Mulatos	Ordinaria	19° 42´	66° 48´	3815	1983-94	Puna seca
Uyuni	Principal	20° 27´	66° 49´	3660	1943-94	Puna seca
Abra de Napa	Pluviométrica	20° 33´	68° 34´	3630	1983-93	Puna desértica
Colcha-K	Ordinaria	20° 45´	67° 39´	3780	1979-94	Puna desértica
Julaca	Ordinaria	20° 57´	67° 57´	3665	1975-84	Puna desértica
Calcha de Lipez	Termopluviomet.	21° 01´	67° 34´	3670	1983-94	Puna desértica
Alota	Pluviométrica	21° 28´	67° 39´	3609	1985-94	Puna desértica
Laguna Colorada	Ordinaria	22° 13´	67° 42´	4228	1979-94	Puna desértica

Fuente: Senamhi, 1993. * Cabrera, 1968

Cuadro 2. Valores medios anuales para cada estación climatológica

VARIABLE	SGM	R-M	UYN	A-N	C-K	JCL	C-L	ALT	L-C
Temperatura media (°C)	9.0	5.7	8.5		9.4	6.2	7.3		0.2
Temperatura media máx. (°C)		15.7	17.6		17.6	16.9	19.1		10.7
Temperatura media mín. (°C)		-2.8	-3.0		1.1	-4.2	-4.6		-8.9
Temperatura máx. extrema (°C)		19.3	21.6		21.6	20.5	22.3		17.4
Temperatura mín. extrema (°C)		-7.8	-8.9		-3.1	-11.0	-9.3		-17.0
Días con heladas		213	207		123	249			324
Precipitación media (mm)	236	270	168	142	161	154	165	121	59
Precipitación máx. 24 horas (mm)			5.7	3.8			4.6	3.3	
Días con lluvia	26	50	33		36	16	28		15
Evapotranspiración (mm)	577	506	564		538	495	544		357
Evaporación / día (mm)			4.9						
Humedad relativa %		32.2	33.5		36.7	45.2	32.7		36.1
Brillo solar (horas)			8.9			9.1			
Radiación solar (ly/día)		430	431		507		490		478
Presión atmosférica (hPa)			654						
Nubosidad (octavos)		3.0	2.9		1.5		1.9		2.1
Días despejados			73						
Días parcialmente nublados			190						
Días nublados			77						
Días cubiertos			12						
Viento Dirección. Velocidad (km/h)		NO 11,1	NO 16,6		NO 7,4	N 22,2			

SGM: Salinas de Garcí-Mendoza. R-M: Río Mulatos. UYN: Uyuni. A-N: Abra de Napa. C-K: Colcha-K. JCL: Julaca. C-L: Calcha de Lipez. ALT: Alota. L-C: Laguna Colorada. Fuente: Terceros, 1997

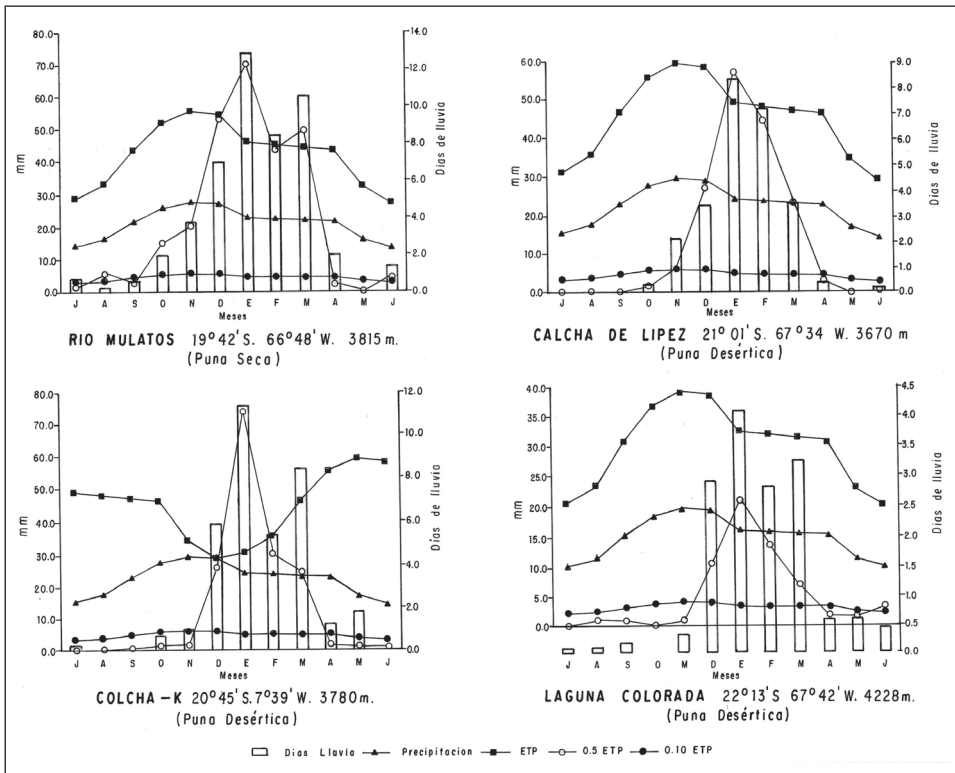


Figura 3. Variación de la precipitación, días con lluvia y ETP en cuatro estaciones climatológicas del Altiplano sur

en forma de nieve, pero se desconoce su monto, ya que no se han llevado registros de este hidrometeoro.

Evapotranspiración y balance hídrico: A pesar de las limitaciones que presenta el método de Thornthwaite, fue utilizado para el cálculo de la evapotranspiración, ya que los datos disponibles para la mayor parte de las estaciones consistían únicamente de precipitación y temperatura. Sin embargo, se empleó la versión Thornthwaite-distribuido para la determinación final de la ETP y del balance

hídrico, cuyos resultados se presentan en el cuadro 4.

El balance hídrico del altiplano sur es negativo, ya que la ETP supera a la precipitación en todas las estaciones. Se presenta un gradiente noreste – suroeste, similar al de la precipitación, y en general el índice de aridez se incrementa también en el mismo sentido. La relación precipitación / ETP, varía de 0.41 para Salinas Garcí-Mendoza y 0.53 para Río Mulatos, a 0.17 en Laguna Colorada. Estas condiciones de semiaridez en el noreste a una aridez más extrema en el suroeste son

Cuadro 3. Valores de precipitación para los años más húmedos y más secos

ESTACIÓN	AÑO CON MAYOR PRECIPITACIÓN (mm)	AÑO CON MENOR PRECIPITACIÓN (mm)	DIFERENCIA (mm)
Salinas Garcí-Mendoza	689 (1984)	0 (1964)	689
Río Mulatos	751 (1984)	20 (1983)	730
Uyuni	416 (1984)	31 (1980)	385
Abra de Napa	235 (1984)	64 (1988)	171
Colcha-K	447 (1984)	24 (1980)	423
Julaca	430 (1955)	22 (1983)	408
Calcha de Lipez	507 (1984)	9 (1983)	498
Alota	166 (1986)	28 (1990)	138
Laguna Colorada	103 (1992)	20 (1985)	83

Cuadro 4. Balance hídrico – Altiplano sur de Bolivia. (Método Thornthwaite-distribuido)

ESTACIÓN	PRECIP. mm	ETP Mm	ETR Mm	DÉFICIT mm	ÍNDICE ARIDEZ	ÍNDICE HUMEDAD	ÍNDICE HÍDRICO ANUAL
Salinas Garcí-Mendoza	236	577	175	402	69.5	0.0	-41.7
Río Mulatos	270	506	240	266	52.5	0.0	-31.5
Uyuni	168	564	157	400	71.0	0.0	-42.6
Colcha-K	162	538	136	401	74.6	0.0	-44.8
Julaca	154	495	123	370	74.8	0.0	-44.9
Calcha de Lipez	165	544	154	387	71.1	0.0	-42.7
Lag. Colorada	60	357	60	295	82.7	0.0	-49.6

ETP: Evapotranspiración potencial; ETR: Evapotranspiración real

corroboradas, además, por otros índices como el del PNUMA y el de Dantin-Revenge (Cuadro 5). En ningún caso se presenta algún exceso de agua temporal, ya que la condición de déficit es permanente a lo largo del año.

Si comparamos la precipitación de cada mes con la ETP, $\frac{1}{2}$ ETP y $\frac{1}{10}$ ETP (de acuerdo al método propuesto por Cochemé & Franquin, 1967), obtenemos un cuadro de los meses húmedos, secos, muy secos y extremadamente secos (Cua-

dro 6). Los meses en que la precipitación ha sido mayor que la ETP se han considerado *húmedos*; cuando el valor de la precipitación está entre la ETP y $\frac{1}{2}$ ETP, se han considerado *secos*; cuando la precipitación está entre $\frac{1}{2}$ ETP y $\frac{1}{10}$ ETP, se han considerado *muy secos*; y finalmente cuando la precipitación es menor a $\frac{1}{10}$ ETP, se han considerado como *extremadamente secos*. Los gráficos individuales para cada estación están presentados en la figura 3.

Cuadro 5. Índices de aridez según el método Thornthwaite, PNUMA y Dantin-Revenga

ESTACIÓN	THORNTHWAITE IA = 100D/ETP	PNUMA I = P/ETP	DANTIN-REVENGA I = 100 T/P
Salinas Garcí-Mendoza	69.5 árido	0.41 semiárido	3.8 árido
Río Mulatos	52.5 semiárido	0.53 seco-subhúmedo	2.1 semiárido
Uyuni	71.0 árido	0.30 semiárido	5.1 árido
Colcha-K	74.6 árido	0.30 semiárido	5.8 árido
Julaca	74.8 árido	0.31 semiárido	4.0 árido
Calcha de Lipez	71.1 árido	0.30 semiárido	4.4 árido
Laguna Colorada	82.7 árido	0.17 árido	6.2 desértico

Cuadro 6. Número de meses húmedos, secos, muy secos y extremadamente secos para cada estación climatológica

ESTACIÓN	MESES HÚMEDOS	MESES SECOS	MESES MUY SECOS	MESES EXTREMAD. SECOS
Salinas Garcí-Mendoza	2	1	1	8
Río Mulatos	2	2	4	4
Uyuni	1	2	2	7
Colcha-K	1	2	1	8
Julaca	2	0	2	8
Calcha de Lipez	1	2	2	7
Laguna Colorada	0	1	4	7

De acuerdo con lo expuesto en el cuadro 6, para todos los lugares el 75 % de los meses se clasifican como muy secos a extremadamente secos.

Radiación y temperatura

Radiación: La radiación solar global presenta valores muy elevados, debido a la altitud del altiplano (>3.500 msnm), a la presencia de una atmósfera con muy poco vapor de agua (< 6 hPa) y muy poco material particulado en suspensión. La radiación media varía entre 416.9 Wm⁻² en

Río Mulatos (3.815 msnm) y 491.5 Wm⁻² en Colcha-K (3.780 msnm) ubicado 1º de latitud más al sur. Los valores más altos ocurren de noviembre a diciembre (619.5 Wm⁻² en Colcha-K) y el mes con menor radiación es junio (327.7 Wm⁻² en Uyuni a 3.660 msnm, casi a la misma latitud de Colcha-K).

Vacher *et al.* (1993) reportan valores parecidos para el altiplano norte (promedios anuales de 494 Wm⁻² y 522 Wm⁻² para Viacha y Patacamaya respectivamente). Valores máximos diarios de más

de 700 Wm^{-2} (con máximos al mediodía superiores a 1300 Wm^{-2} , valor cercano a la Constante Solar) son reportados por Vacher *et al.* (1993) y por Hardy *et al.* (1998) para el Sajama (6.542 msnm, $18^{\circ} 06' \text{ S}$). Esta radiación incidente alta favorece el aporte energético a los cultivos (entre ellos la quinua), ya que estimula la fotosíntesis (Terceros, 1997). Sin embargo, junto con el aumento de la radiación con la altura, también se incrementa la proporción de radiación ultravioleta (que podría estar en un estimado de 30 % cada 1.000 m, para días despejados). Este aumento de la radiación UV puede provocar algunos tipos de estrés sobre las plantas (Levitt, 1980) y animales. Por otro lado, la alta radiación solar incrementa también la tasa de evapotranspiración.

Temperatura: Las condiciones térmicas del altiplano sur están determinadas por su cercanía a la faja subtropical sur (Trópico de Capricornio), la altitud (alrededor del nivel 620 hPa), las diferencias en la radiación incidente, la escasa nubosidad y las condiciones de la superficie del suelo y la vegetación (valores relativamente altos de albedo). Las temperaturas medias anuales varían desde 9.4° C (Colcha-K) a 0.2° C en el extremo sur (Laguna Colorado). Temperaturas extremas muy bajas ocurren con alguna frecuencia en algunos períodos invernales. Charaña, en el borde con Chile, ha registrado -23.5° C y Oruro -22.4° C (Johnson, 1976). Por encima de 4.200 msnm, los datos son muy escasos. Sin embargo, recientemente se han instalado dos estaciones automáticas en el altiplano norte, en Illimani (6.265

msnm) y Sajama (6.542 msnm), (Hardy *et al.*, 1998).

Los factores advectivos, como se discutíó antes, junto con la declinación solar determinan los cambios térmicos estacionales. La combinación latitud-altitud-topografía juega un papel importante en el régimen termométrico. Los meses cálidos se presentan de octubre a abril en el sector norte, y de diciembre a marzo en el sector sur. La amplitud térmica diaria llega a alcanzar 25° C durante los meses de junio a agosto. La relación entre altitud y temperatura mínima no está bien definida debido a que pueden ocurrir gradientes térmicos muy pronunciados (Johnson, 1976), para diferentes lugares y períodos.

Heladas: Debido a la altitud y las condiciones climáticas, la ocurrencia de heladas es un fenómeno frecuente en el altiplano sur, lo que limita en extremo la producción agrícola y afecta las condiciones biológicas del suelo (Le Tacon *et al.*, 1992). La mayor parte de las heladas son de tipo radiativo, causadas por enfriamiento del suelo y los órganos vegetales. La influencia de la topografía es importante, debido a que se producen flujos catabáticos de aire desde las posiciones de vertiente hacia las pampas y fondos de valle. Este aspecto es manejado por los campesinos que identifican a las laderas como áreas de menor riesgo (Terceros, 1997). Durante el invierno (junio-agosto) también pueden presentarse, ocasionalmente, heladas provocadas por invasión de aire frío del sur.

Le Tacon *et al.* (1992) señalan variaciones en los efectos de las heladas, debidas al tipo de suelo. Suelos pedregosos tienden a ser más calientes, los limo-arcillosos más fríos y los arcillosos tienen un comportamiento térmico intermedio.

El número de días al año con heladas varía de 324 en Laguna Colorada (4.228 msnm, extremo suroeste) a 123 en Colcha-K (3.780 msnm, sector noreste). Las heladas ocurren con más frecuencia en los meses de mayo a septiembre (más de 25 días/mes), pero las más peligrosas son las que se presentan en enero y febrero, ya que los cultivos se hallan en su fase de floración. La irregularidad en el comportamiento de este fenómeno complica la determinación de un período libre de heladas en el año (Monasterio y Andressen, 1996; Terceros, 1997).

Vientos: Debido a la altitud del altiplano, el viento en superficie está referido al nivel de 4 km (~ 620 hPa). En general, los vientos son del oeste (Auza, 1972). Sin embargo, el relieve modifica el flujo superficial y en el altiplano sur los vientos son básicamente del O y NO, en su sector norte (Salinas G-M y R. Mulatos), del NO y NE en su sector medio (Uyuni), y del N y NE, un poco más hacia el sur (Julaca). Los vientos N, NO y O alcanzan velocidades de 4 a 12 m s⁻¹ (14,4 a 43,2 km h⁻¹) y son frecuentes en los meses de enero a abril.

Desde el punto de vista agrícola, los vientos más perjudiciales son los de septiembre-octubre, ya que producen el enterrado de las plántulas germinadas de quinua, y los vientos de abril que producen

daños a las cosechas (Terceros, 1997).

Por encima de 5.000 msnm, los vientos tienden a variar estacionalmente entre el NO y el NE y ya por encima de los 7.000 msnm (atmósfera libre), el flujo se regulariza como del O y NO en primavera, del E y SE en verano y del O y NO en otoño e invierno (Auza, 1972). Lo anterior hace suponer que el nivel de 7.000 msnm representa el tope de la capa de fricción sobre el altiplano. El cambio de dirección del viento, en verano, en todos los niveles está asociado con la advección de aire amazónico, que favorece las precipitaciones en esta temporada.

A nivel local, en el Salar de Uyuni, que tiene una extensión de 3.515 km², se presentan varios patrones de circulación diaria, determinados por los factores meteorológicos y geográficos dominantes en el sitio. Galvez (2006) señala que hay seis mecanismos responsables por los patrones de circulación observados en el Salar de Uyuni: un patrón de brisas reversible entre el día y la noche, un patrón de vientos anabáticos-katabáticos, la incursión vespertina de fuertes vientos del oeste, provenientes de las laderas oeste de los Andes, los efectos de la capa límite de fricción sobre el flujo diurno, el transporte descendente de momento desde la alta troposfera y los efectos aislados de convección.

Eventos El Niño-Oscilación Sur (ENOS)

El fenómeno ENOS produce efectos sobre el clima en diferentes partes del mundo, donde se han podido establecer variaciones de elementos climáticos, como la pre-

precipitación y la temperatura, debidas a su influencia (Ropelewski & Halpert, 1987; Nicholls, 1988; Schonher & Nicholson, 1989).

En las regiones tropical y subtropical de Suramérica, el fenómeno ENOS ocasiona perturbaciones en el régimen de lluvias y vientos que, según Martin *et al.* (1995), son generados por los siguientes mecanismos:

- El desplazamiento hacia el oeste de la zona de convección, normalmente centrada en la cuenca amazónica (Hastenrath, 1991), que ocasiona abundantes lluvias en el norte de Perú y un déficit en la Amazonia oriental,
- el fortalecimiento de la corriente de chorro subtropical (Kousky *et al.*, 1984) que ocasiona la formación de una zona de bloqueo, que provoca:
 - lluvias anormalmente abundantes en la zona de bloqueo,
 - un déficit pluviométrico al norte del bloqueo, y
 - la interrupción de la penetración de aire amazónico en los Andes centrales.

Ortlieb (1955b) indica que los eventos Niño se caracterizan por producir excesos de precipitación en el norte de Perú y en Chile central, mientras que se observan deficiencias pluviométricas en el altiplano del sur de Perú y Bolivia.

Por otro lado, Ronchail (1995) sostiene que en los años Niña la tendencia es hacia fuertes lluvias en el altiplano y sequía en los llanos del sur.

Lamentablemente, para el altiplano sur no hay series históricas que cubran

totalmente un período largo (por ejemplo, desde 1940). Si se analizan las anomalías pluviométricas de las series de Salinas G-M, Uyuni y Julaca, con respecto a la mediana y se comparan estos resultados con un catálogo de años Niño / Niña preparado con base en Quinn (1995), Fraedrich & Müller (1992) y Alan *et al.* (1996), se puede evaluar, de manera preliminar, la influencia de ENOS sobre la precipitación en el altiplano sur (Cuadro 7; Figura 4).

El cuadro 8 muestra el número de años por encima, aproximadamente igual y por debajo de la mediana, de acuerdo con los datos del cuadro 7.

De acuerdo con lo anterior, en los años Niño hay una tendencia a menores precipitaciones. Se destaca particularmente el intervalo 1965-67, cuando las deficiencias pluviométricas fueron mayores a una desviación estándar (166 mm) para la estación SG-M.

Según Ronchail (1995) el período 1952-72 se caracterizó por ser más seco de lo normal, y los años posteriores por ser más húmedos. En ese período (1952-72) se presentaron 10 años clasificados como Niños y 6 como Niñas. Sin embargo, el año 1972 fue particularmente húmedo (565 mm en SG-M).

En los años Niña, la tendencia es hacia mayores precipitaciones y es más marcada esta influencia que la anterior.

Quedan, sin embargo, muchas dudas en cuanto a la relación entre los eventos ENOS y la precipitación en el altiplano sur. Se requiere disponer de series históricas más largas y consistentes, para poder realizar análisis estadísticos más

Cuadro 7. Precipitación anual (mm) y eventos ENOS en el altiplano sur de Bolivia

AÑO	SGM	R-M	UYN	A-N	C-K	JLC	C-L	ALT	L-C	ENOS
1943			122							+ M 1
1944			116							+ M 1
1945			88							
1946			213			136				
1947	215		178			230				
1948	244		129			85				
1949	441					293				-- 2
1950	102					83				
1951	170					79				+ M 1,2
1952	226					161				+ F 1
1953						211				+ F 1,2
1954						278				-- 2
1955	466					430				
1956	196					91				
1957						96				+ F 1,2
1958						90				+ F 1
1959	71					52				
1960	114									
1961	45									
1962	64									
1963	211									
1964	*0									-- 2
1965	4									+ F 1,2
1966	24									-- 2
1967	18									
1968	205									+ M 1
1969	221									+ M 1,2
1970	205									-- 2
1971	419									
1972	565									+ F 1,2
1973	288									-- 2
1974	277					177				
1975	378		324			295				-- 2
1976	406		129			148				+ F 1,2
1977	464		234			206				+ F 1
1978	316		229			111				-- 2
1979	342		91		143	174				+ M 1
1980	109		31		24	38			30	
1981	332		162		127	86			101	

1982	223	33	230		46	44			59	+ MF 1,2
1983	48	20	62		26	22	9		48	+ MF 1
1984	689	*751	416	355	447	227	507		144	
1985	179	556	129	156	142		184	129	20	
1986		472	166	189	358		145	166	70	+ F 1,2
1987		389	248	115	237		133	124	70	+ F 1
1988		214	126	64	96		171	135	34	-- 2
1989		131	49	89	95		56	112	39	
1990		151	123	108	127		144	28	32	+ M 1
1991		206	79	110	130		189	150	55	+ M 1
1992		220	170	124	217		136	101	103	
1993		274	364	112	239		138	123	21	
1994		128	153		126		168	123	72	
MEDIA	236	273	168	142	161	154	165	119	60	
MEDIANA	215	214	141	114	129	136	145	124	55	
DESV. ESTÁNDAR	166	206	93	78	112	97	115	35	34	

SGM: Salinas de Garci-Mendoza. R-M: Rio Mulato. UYN: Uyuni. A-N: Abra de Napa. C-K: Colcha-K. JLC: Julaca. C-L: Calcha de Lipez. ALT: Alota. L-C: Laguna Colorada. EVENTOS E N O S: + Niño. M: Mediano; F: FUERTE; MF: Muy Fuerte; -Niña (EVENTOS ENSO: 1- QUINN, 1995; 2- FRAEDRICH & MÜLLER, 1992; ALAN *et al.*, 1996)

Cuadro 8. Número de años mayores que, aproximadamente iguales a, y menores que la mediana de los valores de precipitación

EVENTO	TOTAL	> MEDIANA	%	≅ MEDIANA	%	< MEDIANA	%
Niño	22	8	36	2	9	12	55
Niña	12	7	59	1	8	4	33

elaborados. También se requiere tener un mejor conocimiento de la circulación atmosférica sobre la región.

Discusión y conclusiones

No hay duda de que en el altiplano sur de Bolivia existe un marco geográfico-climático que genera las condiciones propicias para que la región sea predominante-

mente seca. Entre los factores geográficos, la localización del altiplano sur en la faja subtropical del sur es determinante, ya que la región queda bajo la influencia de una circulación atmosférica regional que, combinada con las características fisiográficas (altiplanicie bordeada por cadenas montañosas), favorecen las condiciones de aridez antes señaladas.

Los factores físicos han sido y son muy importantes en el proceso de desertifica-

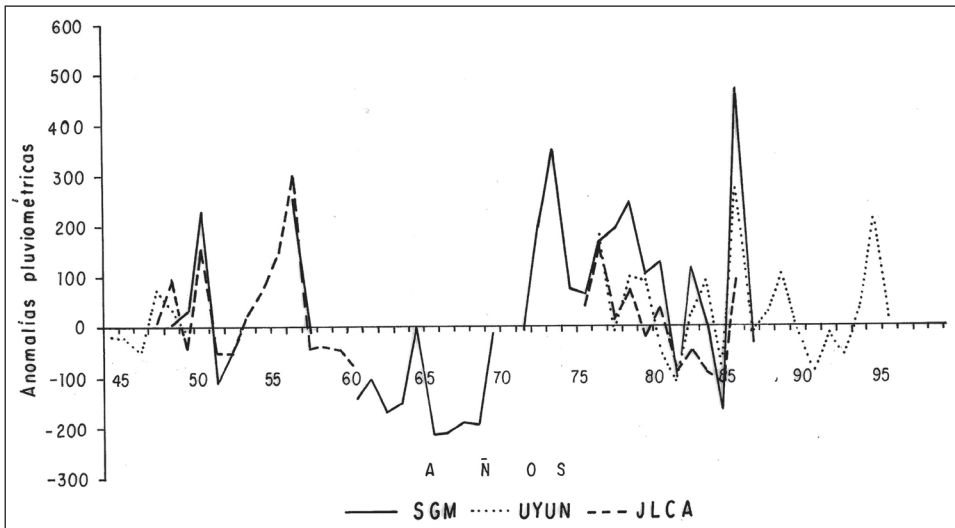


Figura 4. Variación temporal de las anomalías pluviométricas en las estaciones climatológicas Salinas Garci-Mendoza, Uyuni y Julaca

ción de la región. La evolución paleoclimática nos muestra que el clima siempre fue seco, con algunas oscilaciones de relativa mayor humedad, lo que favoreció, en el pasado, el proceso de desertización. Probablemente las condiciones del clima actual se desarrollaron aproximadamente 1.500 años AP, y entre sus principales características están: su baja precipitación (< 300 mm/año), un balance hídrico negativo, una alta radiación, temperaturas bajas (medias anuales entre 0° y 9° C), con grandes amplitudes térmicas y heladas muy frecuentes.

En el proceso de desertificación actual, los factores antrópicos juegan un papel muy importante junto con el clima. El uso de la tierra, restringido por las condiciones climáticas, se dedica principalmente al pastoreo de camélidos y ovejas y al cultivo de la quinua.

En tiempos precolombinos la región estuvo sometida a la crianza extensiva de camélidos bajo un sistema de pastoreo estacional que, aparentemente, estaba en equilibrio con la capacidad de carga ecológica del área. Con la conquista española se introdujeron nuevos cultivos, tecnología y ganado europeo (ovejas, vacas y cabras) situación que, según Libermann y Qayum (1994), produjo un gran desequilibrio ecológico. Los suelos y la vegetación han sido, desde entonces, sometidos a un intenso sobrepastoreo, favoreciendo la degradación de las tierras y el avance de las condiciones áridas. En algunos casos el sobrepastoreo ha causado problemas extremos de erosión de suelos, reduciendo el nivel de subsistencia de los campesinos.

Otro factor antrópico es la extracción de leña por las comunidades campesinas,

para uso como recurso energético. Este problema se agrava por las explotaciones mineras y los cuarteles que emplean grandes cantidades de leña para sus operaciones. En el pasado la construcción del ferrocarril, que atraviesa la región, también produjo degradación de la cobertura vegetal (Terceros, 1997).

El manejo de los cultivos con la introducción, en 1972, de maquinaria agrícola para la producción de quinua y la introducción de otras tecnologías agrícolas ha desencadenado, según Terceros (1997), una serie de alteraciones que han agravado el problema. Entre estas alteraciones se señalan: la acelerada ampliación de la frontera agrícola, la degradación de la cobertura vegetal y de los suelos, incremento en la erosión eólica, cambios en el albedo superficial, intensificación de las heladas e incrementos en los ataques a los cultivos por plagas e insectos. Todo esto ha repercutido desfavorablemente en el rendimiento agrícola y, además, ha contribuido al proceso de desertificación (Monasterio y Andressen, 1996).

La degradación de la vegetación y del suelo incrementan el albedo de la superficie, lo que disminuye la cantidad de radiación de onda corta absorbida (Charney, 1975; Picón, 1984), lo que, a su vez, reduce la radiación neta, el calor sensible y el calor de evaporación. Este proceso tiende a limitar la convección y reducir, por lo tanto, la nubosidad y la precipitación, intensificando el proceso de desertificación.

El otro factor que hay que considerar es la disminución en la longitud de la rugosidad (*Roughness length*), causado

por la remoción de la cobertura vegetal. Este proceso también conduce a una disminución de la radiación neta y, en última instancia, a una reducción o supresión de la precipitación.

Con base en la discusión anterior, podemos concluir que el proceso de desertificación en el altiplano sur de Bolivia es complejo. Existe un marco geográfico-climático adverso, que hace que la región sea frágil y vulnerable a los efectos de acciones antrópicas inadecuadas.

Agradecimientos

A la Oficina Regional de Ciencia y Tecnología para América Latina y el Caribe de la UNESCO, por su apoyo para la Misión de Asistencia Técnica al *Programa Nacional de Lucha contra la Desertificación y la Sequía de Bolivia*, efectuada en julio de 1996.

Al *Programa Nacional de Lucha contra la Desertificación y la Sequía (PRONALDES)* del Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente de Bolivia, especialmente a los Ingenieros F. Zambrana y A. Beltrán, por el apoyo logístico a nuestra misión y el suministro de información.

Al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) de Bolivia.

Con Máximo Libermann Cruz, profesor de la Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia, estamos doblemente agradecidos: Por un lado, nos introdujo en el complejo y apasionante mundo de la ecología del Altiplano sur; pero sobre todo recibimos la generosa hospitalidad de su amable familia.

Referencias citadas

- ALAN, R.; LINDESAY, J. and D., PARKER. 1996. **El Niño - Southern Oscillation and climate variability**. CSIRO Publ., Australia. 405 p.
- ARGOLLO, J. y P. MOURGUIART. 1995. Los climas cuaternarios de Bolivia. En: Argollo y Mourguiart. (Eds). **Cambios Cuaternarios en América del Sur**. 135-155.
- AUZA C., J. A. 1972. *A statistical analysis of upper level winds at La Paz*. US Air Force Publication 18. (January, 1972). 24 p.
- CABRERA, A. 1968. Ecología vegetal de la Puna. En: Troll (Ed). **Geoecología de las regiones montañosas de las Américas tropicales**. 223 p.
- CHARNEY, J. G. 1975. *Dynamics of deserts and drought in the Sahel*. **Quarterly J. of the Royal Meteor. Soc.**, 101(428): 193-202.
- CLAURE-PEREIRA & ASOCIADOS. 1991. *Estudio de recursos hídricos para el suministro de agua y saneamiento a la población dispersa del Departamento de Potosí. Informe Final*. Proyecto YACUPAJ, PNUD-BIRFCORDEPO-USP. Potosí. 153 p.
- COCHEMÉ, J. and P. FRANQUIN. 1967. **An agroclimatology survey of the semiarid area in Africa, south of the Sahara**. World Meteorological Organization, Geneva.
- FRAEDRICH, K. and K. MÜLLER. 1992. *Climate anomalies in Europe associated with ENSO extremes*. **Int. Journal of Climatology**, 12: 25-31.
- GALVEZ, J. M. 2006. *Study of the diurnal cycle of the atmospheric boundary layer over Salar de Uyuni*. [On line] <http://www.nssl.noaa.gov/projects/pacs/salljex/archive/research/galvez/paper-jmgalvez.htm> (Revisado 01/2006).
- GRAF, K. 1995. *Vegetación y clima de los Andes Bolivianos durante la última época glacial*. **Ecología en Bolivia**, 23: 1-19.
- HARDY, D.R., VUILLE, M., BRAUN, C., KEIMIG, F. and R.S. BRADLEY. 1998. *Annual and daily meteorological cycles at high altitude on a tropical mountain*. **Bulletin American Meteor. Soc.**, 79(9): 1899-1913.
- HASTENRATH, S. 1991. **Climate dynamics of the tropics**. Kluwer Academic Publishers. 488 p.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). 1996. *Climate change 1995: Impacts, adaptations and mitigation of climate change. Scientific-technical analysis*. Cambridge University Press, p. 171-189.
- JOHNSON, A. M. 1976. The climate of Perú, Bolivia and Ecuador. En: Johnson, W. (Ed) **World survey of climatology**, Vol. 12. Chapter 4. New York: Elsevier Scientific Publ. 147-218.
- KOUSKY, V., KAGANO, M. and Y. CAVALCANTI. 1984. *A review of the Southern Oscillation: oceanic-atmospheric circulation changes and related rainfall anomalies*. **Tellus**, 36A: 490-504.
- LE TACON, P.; ALLIROL, G.; VACHER, J.; BOSSENO, R.; ELDIN, M.; IMAÑA, E. y R. MALDONADO. 1992. Los riesgos de helada para la agricultura en el Altiplano boliviano. *Symposium-Workshop on practical applications of agrometeorology to plant protection*. OMM, Asunción, Paraguay (Abril, 1992).
- LEVITT, J. 1980. **Responses of plants to environmental stresses**. Academic Press. 607 p.
- LIBERMANN C., M. y QAYUM, S. 1994. **La desertificación en Bolivia**. La Paz, Liga de Defensa del Medio Ambiente. 126 p.

- MARTIN, L.; BERTAUX, J.; LEDRU, M-P.; MOURGUIART, P.; SIFEDDINE, A.; SOUBIÈS, F. y B. TURQ. 1995. *Perturbaciones del régimen de las lluvias y condiciones de tipo Niño en América del Sur tropical desde hace 7000 años*. **Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines**, 24(3): 595-605.
- MDSMA. 1996. *Programa nacional de lucha contra la desertificación y la sequía (PRO-NALDES)*. Resumen Ejecutivo. La Paz, Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente-Subsecretaría de Recursos Naturales. 48 p.
- MONASTERIO, M. y R. ANDRESSEN. 1996. *Asesoría Técnica en el Marco del Programa MAB-UNESCO para el Programa de Lucha contra la Desertificación y la Sequía del Gobierno de Bolivia: Informe Final*. Mérida, Venezuela, Septiembre de 1996.
- MONTES DE OCA, I. 1989. **Geografía y recursos naturales de Bolivia**. La Paz, Editorial Educacional. 526 p.
- MÖRNER, N. A. 1992. Present El Niño-ENSO events and past super-ENSO events: effects of changes in the earth's rate of rotation. En: Ortlieb & Macharé (Eds). **Paleo-ENSO records: International symposium**. 4-7 marzo (1992), 201-206. Lima.
- NICHOLLS, N. 1988. *El Niño-southern oscillation and rainfall variability*. **Journal of Climate**, 1: 418-421.
- ORTLIEB, L. 1995a. Paleoclimas cuaternarios en el norte grande de Chile. En: Argollo & Mourguiart (Eds). **Cambios cuaternarios en América del Sur**. 225-246.
- ORTLIEB, L. 1995b. *Eventos El Niño y episodios lluviosos en el desierto de Atacama: el registro de los últimos dos siglos*. **Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines**, 24(3): 519-537.
- PAF-BOL. 1995. *Programa de acción forestal para los trópicos*. FAO. Roma.
- PICON, L. 1984. *Les phénomènes de désertification. Cas du Sahel*. **La Météorologie**.
- QUINN, W. 1995. *The large-scale ENSO event, the El Niño and other important regional features*. **Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines**, 22(1): 13-34.
- RONCHAIL, J. 1995. *Variabilidad interanual de las precipitaciones en Bolivia*. **Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines**, 24(3): 369-378.
- ROPELEWSKI, C. F. and M. S. HALPERT. 1987. *Global and regional scale precipitation patterns associated with El Niño/Southern Oscillation*. **Monthly Weather Rev.**, 115: 1606-1626.
- RUBIO, J. L. and E. BOCHET. 1998. *Desertification indicators as diagnosis criteria for desertification risk assessment in Europe*. **J. of Arid Environments**, 39: 113-120.
- SCHONHER, T. and S. E. NICHOLSON. 1989. *The relationship between California rainfall and ENSO events*. **Journal of Climate**, 2: 1258-1269.
- SENAMHI. 1993. **Boletín meteorológico del departamento de Potosí**. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. 375 p.
- TERCEROS, L. F. 1997. *La desertificación y los procesos de transformación del sistema productivo en tres comunidades del Altiplano Sur de Bolivia*. Universidad de Los Andes, Centro de Investigaciones Ecológicas de los Andes Tropicales. Tesis de Magister Scientiae en Ecología Tropical. Mérida-Venezuela. 207 p.
- THOMAS, D. S. G. and MIDDLETON, N. J. 1994. **Desertification. Exploding the myth**. John Wiley & Sons. 194 p.

- UNEP. 1994. *United Nations Convention to Combat Desertification in those countries experiencing serious drought and/or desertification particularly in Africa*. Geneva: United Nations Environment Programme for the Convention to Combat Desertification (CCD), Interim Secretariat for the CCD. 71 p.
- VACHER, J.; IMAÑA, E. y E. CANQUI. 1993. *Las características radiativas y la evapotranspiración potencial en el Altiplano boliviano*. **Revista de Agricultura**, 5-11.
- VUILLE, M. and C. AMMANN. 1997. *Regional snowfall patterns in the high arid Andes*. **Climate Change**, 36: 413-423.
- WMO. 1975. *Drought and agriculture*. Technical Note No. 138. World Meteorological Organization.
- WMO. 1994. *Drought and desertification*. WMO/TD No. 605. World Meteorological Organization.