

El clima y sus efectos en la vegetación

Paul Emck^{1,2}, Andrés Moreira-Muñoz^{1,3} & Michael Richter^{1,*}

¹Instituto de Geografía, Universidad Erlangen-Nürnberg,
Kochstrasse 4/4, 91054, Erlangen, Alemania

²pemck@gmx.net, ³amoreira@geographie.uni-erlangen.de

*Autor de correspondencia: mrichter@geographie.uni-erlangen.de

Abstract

The characteristics of the climate and its effects on the vegetation of the Central Andes between the Girón-Cuenca valley in Ecuador and the Cordillera de Atacama in Northern Chile is described. The climatic background is given at three different scales: the macroclimatic scale treats the systems of atmospheric pressure and patterns of circulation; the intermediate scale depends on the general system, but exhibits regional differences; examples of the microclimatic scale are given especially for the Cordillera de Atacama. The relation climate - vegetation is shown by means of examples from South Ecuador and South Perú. Southern Ecuador (Cordillera Real) is dominated by hygrothermic complexity due to the heterogenous relief. The climatic W-E contrast is marked and influences the distribution of semideciduous and evergreen forests in the lower parts of the area as well as different types of mountain forests and páramos. In the SW slopes of southern Peru (between ríos Colca and Tambo) the vegetation is more homogenous although there are differences along the gradient SW-NE: from the loma vegetation of the coast, passing through the hyperarid desert to the tolares and cushion plants at higher altitude. The life conditions of Andean plants are extreme: intense drought and short growth period. The Central Andes have a long history of geobotanical exploration, since the 18th century, and this allows us to emphasize the role of this zone for the development of the discipline of biogeography. In spite of this there are sector that have only recently been investigated, such as the Huancabamba Depression, with sectors in several angiosperm families. The Central Andes is a center of plant diversity of continental and global importance, in close association with the topographic and climatic heterogeneity at different scales.

Key words: Climate, Vegetation, Central Andes, Huancabamba depression.

Resumen

Se exponen las características del clima y sus efectos sobre la vegetación en los Andes Centrales de Sudamérica, comprendidos entre la grieta de Girón-Cuenca en Ecuador y la cordillera de Atacama en el norte de Chile. Los antecedentes se presentan en tres escalas: una escala macroclimática que aborda el sistema de presiones y patrones de circulación sobre los Andes Centrales; sistemas de meso-escala dependientes del sistema general pero con diferencias regionales; y ejemplos de situaciones particulares microclimáticas en la cordillera de Atacama. La relación clima - vegetación se expone mediante dos ejemplos del S Ecuador y S Perú. En el sur ecuatoriano (Cordillera Real) domina una complejidad higrotérmica por el relieve heterogéneo. El contraste climático W-E es marcado, lo que influye la vegetación de bosques semideciduos, siempreverdes en partes más bajas del área así como diferentes tipos de bosques montanos y páramos. Mientras que en la vertiente andina SW del sur peruano (interfluvios de ríos Colca y Tambo) la vegetación es más homogénea, aunque con diferencias en un gradiente SW-NE: desde la vegetación de lomas en la costa, pasando por el desierto hiperárido, hasta las formaciones de tolar y plantas en cojín a mayor altitud. Las condiciones de vida de las plantas andinas son extremas: intensa aridez y corto período vegetativo. Los Andes Centrales tienen una larga historia de exploración geobotánica a partir del siglo XVIII, lo que permite resaltar el rol de esta zona en el desarrollo de la disciplina biogeográfica. Aún así, hay sectores sólo recientemente investigados, como la Depresión de Huancabamba, con novedades en varias familias de angiospermas. Los Andes Centrales son un centro de diversidad florística de importancia continental y global, en asociación estrecha con la heterogeneidad topográfica y climática de la zona en varias escalas de análisis.

Palabras clave: Clima, Vegetación, Andes centrales, Depresión de Huancabamba.

Introducción

Desde un punto de vista climático, los Andes Centrales están delimitados al Sur por la diagonal árida, la cual atraviesa la cadena de los Andes en el sector entre el Volcán Llullaillaco (24°30' S) y el Nevado de Tres Cruces (27°) en dirección SE-NW, en la frontera entre Chile y Argentina (fig. 1). Al sur de este sector prevalecen las lluvias de invierno, mientras que al norte dominan las lluvias de verano (Luebert & Plissock 2006). A la vez, se trata de un límite tropical, según Troll & Paffen (1964), que separa un clima estacional (amplitud de la temperatura estacional > amplitud de temperatura diaria) en el sur, de un clima eminentemente diario (amplitud de temperatura estacional < amplitud de temperatura diaria) en el norte.

Por el norte, los Andes Centrales alcanzan la grieta de Girón-Cuenca, a partir de donde se reconocen los Andes septentrionales. La depresión de Huancabamba, ubicada entre Perú y Ecuador, corresponde aún a los Andes Centrales. Al sur de esta depresión domina una clara separación entre el flanco occidental seco y el flanco oriental húmedo, en cambio hacia el norte ambos son flancos lluviosos. Los Andes Centrales serán considerados a continuación en relación con el sistema de circulación macroclimática, así como en su diferenciación mesoclimática regional y finalmente en cuanto a sus características microclimáticas.

La topografía de los Andes Centrales como base para la diversidad climática

Mientras que el área norte de los Andes Centrales tiene el paso de menor altitud en la Depresión de Huancabamba, el sur de la cordillera de Atacama se trata de uno de los más altos tramos. Así, el Abra de Porculla en el norte de Perú, entre Olmos y Jaén (ca. 6° S) es el paso más bajo (2.145 m) desde Colombia a Chile Central. El Volcán Llullaillaco en la Cordillera de Atacama (6.739 m) y el Huascarán

(6.768 m), en la Cordillera Blanca de Perú son en cambio las alturas principales en el área de estudio. La Cordillera Blanca forma el cordón tropical más alto y único ampliamente englaciado del mundo. En el sector del Abra de Porculla, los Andes Centrales se caracterizan además por lo estrecho de la sección transversal, que abarca apenas 85 km en dirección W-E. En contraposición, el sector más ancho abarca casi 600 km de ancho entre la provincia de Parinacota (Chile) y el así denominado “Codo de los Andes”, al W de Santa Cruz de la Sierra en Bolivia, lugar en que la Cordillera Oriental cambia de rumbo en dirección sur (Figura 1).

Las particularidades topográficas de los Andes Centrales tienen naturalmente consecuencias climáticas, esto es, el clima regional no es solamente condicionado por los sistemas de presiones generales. Por ejemplo, el Altiplano actúa como superficie de calentamiento entre las cordilleras, formando una baja presión regional autóctona durante el día. Aquí se desarrollan células convectivas que tanto desde el Pacífico como principalmente del sector amazónico, configuran un pronunciado sistema de vientos de valle que se traduce en una alta presión en la alta tropósfera (Lenters & Cook 1997). En cambio, en el centro del Perú y Sur de Ecuador las cadenas principales orientadas N-S son acompañadas por profundos valles como el del Río Marañón. En estos sectores septentrionales predominan corrientes de alisios de origen oriental, de forma que muchos valles longitudinales quedan protegidos del viento en una posición de sotavento y son por lo tanto muy secos. En dichos casos son frecuentes las extraordinarias diferencias de humedad en un espacio reducido, como se verá a continuación.

Única en este sentido es la situación en la Depresión de Huancabamba, donde sólo hay una cadena motañosa principal y se aprecian condiciones climáticas similares en ambas laderas: predomina la sequía tanto en la cuenca de Jaén en el Este como en Chiclayo en el Oeste. La topografía variable también es responsable

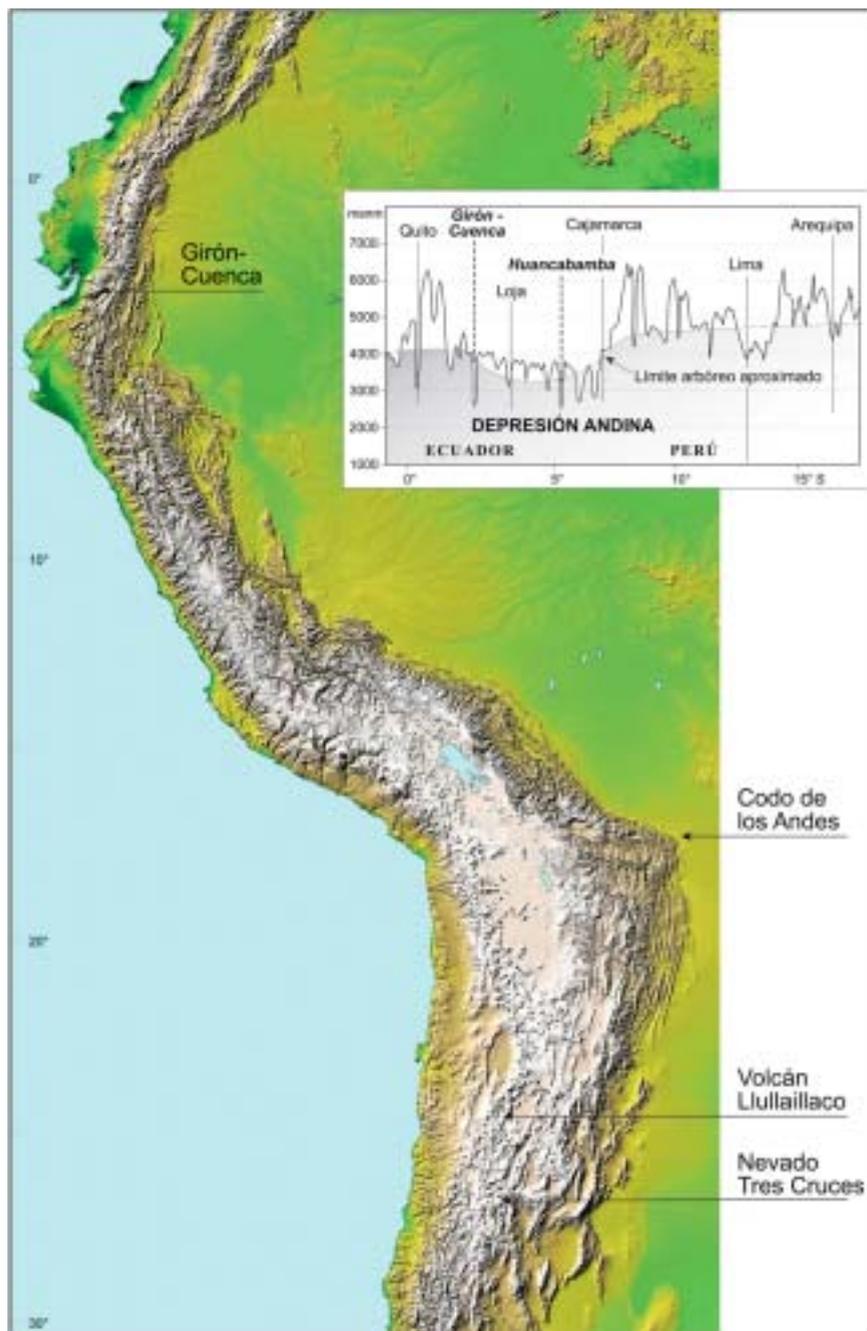


Fig. 1: Area de estudio: los Andes Centrales. Inserto: Perfil meridional (N-S) que ilustra las depresiones de Girón-Cuenca y de Huancabamba. Fuente: modificado de www.wikipedia.org

de una alta complejidad climática, la cual es aparentemente responsable de una flora muy diversa y rica en endemismos, pero aún relativamente desconocida.

Distribución de la presión y patrón de vientos

La parte sur de los Andes Centrales abarca principalmente a Bolivia y el norte de Chile. Este sector es afectado, al nivel de 1.000 hPa (aproximadamente nivel del mar), por los siguientes tres sistemas de presión suprarregionales (Graf 1986, Hoffmann 1992, Weischet 1996, Schmidt 1999, Figura 2):

- a) A lo largo del año el casi estable anticiclón del Pacífico Sur permanece relativamente fijo en su posición por la cadena de los Andes. El anticiclón se encarga de proveer una constante corriente en sentido N o NNW, a lo largo del flanco occidental de la cordillera y es responsable de la diferenciación de las condiciones del tiempo respecto al resto del continente (Miller 1976).
- b) El también relativamente estable anticiclón del Atlántico Sur, el cual provee las masas

- c) de viento provenientes del este hacia el flanco oriental de la cordillera.
- c) Ambos anticiclones están separados por un centro de baja presión que se extiende desde la cuenca del Amazonas por los Andes hacia el sur („vaguada del Sur“). Este centro de baja presión puede generar un patrón de corrientes de aire NE-SW. En los meses de verano esta baja presión se extiende hacia el Sur hasta encontrarse con la depresión orográfico-térmica de Cuyo, al oeste de Córdoba (ver figura 3, sobre todo el nivel de 925 hPa en enero).

La circulación del Hemisferio Sur muestra una fuerte dinámica debido a su marcado contraste de temperatura entre la Antártica y las regiones ecuatoriales, siendo una resultante la gradiente de presión, así como por menores pérdidas de fuerza por roce sobre una superficie eminentemente oceánica. Por ello, el anticiclón del Pacífico Sur es extraordinariamente fuerte a lo largo de todo el año y especialmente en el invierno austral, reconocido a nivel mundial por su persistencia (Trewartha 1961, Endlicher *et al.* 1990). Esto tiene como resultado que a lo largo de la costa Pacífica sopla un constante y fuerte viento sur. El encuentro de estos vientos

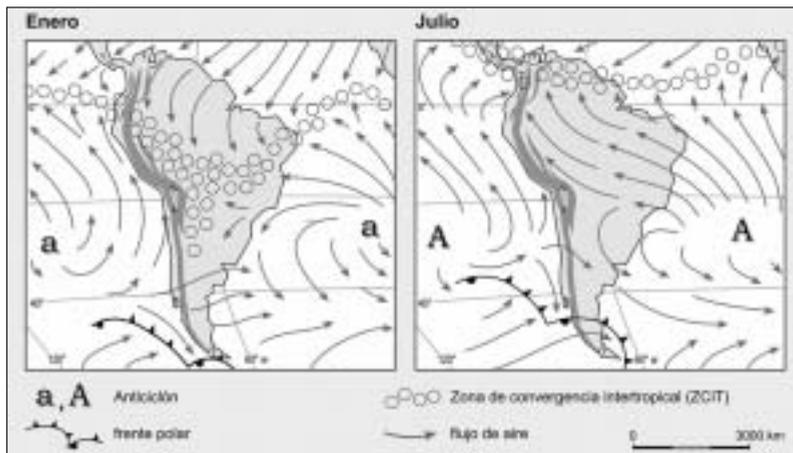


Fig. 2: Comportamiento de la presión y corrientes de viento al nivel de superficie en Sudamérica. “a” y “A” representan la menor y mayor intensidad de los anticiclones.

con la subsidencia de la tropósfera media son la causa de la sequía y la formación del desierto en el flanco occidental. La sequía se extiende hasta Lima y sobre 2.000 m, para retirarse solamente a la latitud de Machala en el Sur de Ecuador (Richter 1996, ver figura 4 arriba, límite árido-semiárido).

La parte Norte de los Andes Centrales comprende principalmente Ecuador, y es

afectada en el nivel 1000-925 hPa por los siguientes tres grandes sistemas de circulación (Richter 2003, Emck 2006, Figura 2):

- a) En el verano, sobre la costa del Sur de Ecuador, el alisio se desplaza desde el anticiclón del Pacífico Sur hacia el NW en la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT); mientras que en el invierno se

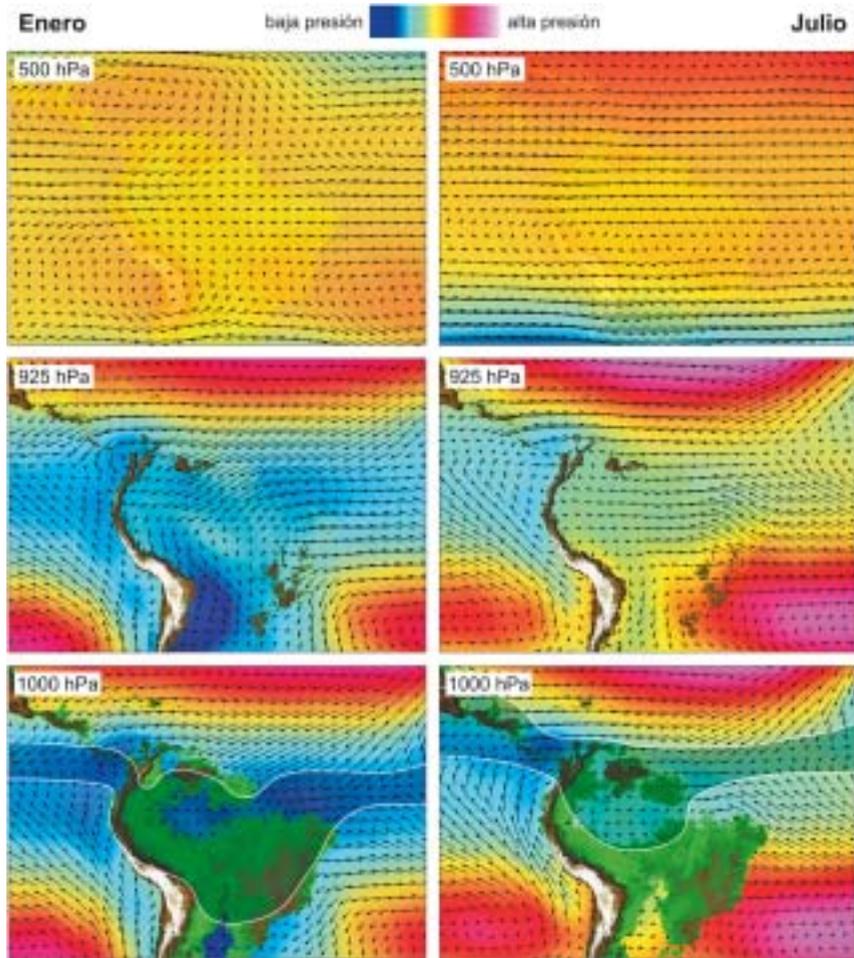


Fig. 3: Presión atmosférica y vientos horizontales durante enero y julio en diferentes niveles de altitud (expresados en hPa) en base a valores promedios de 30 años. 500 hPa = ca. 5.500, 925 hPa = ca. 800 y 1.000 hPa = ca. 0 m. Datos de NCEP/NCAD-reanalysis (<http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.derived.html>) Las líneas blancas en 1.000 hPa muestran la posición de la ZCIT en enero y julio.

- mantiene en la zona costera, cruza el ecuador y se transforma en un monzón lluvioso al norte de Ecuador y Colombia.
- b) En el flanco oriental de los Andes se da un cambio de dirección estacional de los alisios: En el verano provienen desde el anticlón de Azores desde el NE hasta chocar con los Andes y son transformados en una corriente de chorro baja (low-level jet). En el invierno soplan los alisios desde el SE a lo largo del continente sudamericano en dirección de la ZCIT en su posición Norte. Sin embargo, sobre el Amazonas pierden intensidad, contrariamente a los vientos orientales en los niveles más altos (>925 hPa).
- c) La ZCIT permanece en los Andes del Norte relativamente estacionaria y provee de lluvias constantes a lo largo del año –en una especie de “diagonal húmeda”–, tanto en el Chocó (Colombia) al W, como en el

Napo (Ecuador) en el lado oriental. Solamente cuando la ZCIT se desplaza levemente hacia el Sur se dan en el sur de Ecuador cortas corrientes monzónicas, las cuales aportan abundantes precipitaciones en la Cordillera Occidental, así como en las sierras interandinas. Durante cortos períodos de una a dos semanas se puede instalar en el verano una variante de este sistema de circulación, que origina fuertes anomalías del tiempo en el occidente de la Amazonía. El anticlón del Pacífico Sur fortalecido, una relativamente intensa baja presión a lo largo de los Andes orientales y al mismo tiempo debilitados alisios zonales en el nivel de 700-600 hPa ocasionan una pronunciada corriente septentrional a lo largo de los Andes orientales, que pueden generar una dinámica corriente de chorro baja. La amplia subsidencia resultante sobre los

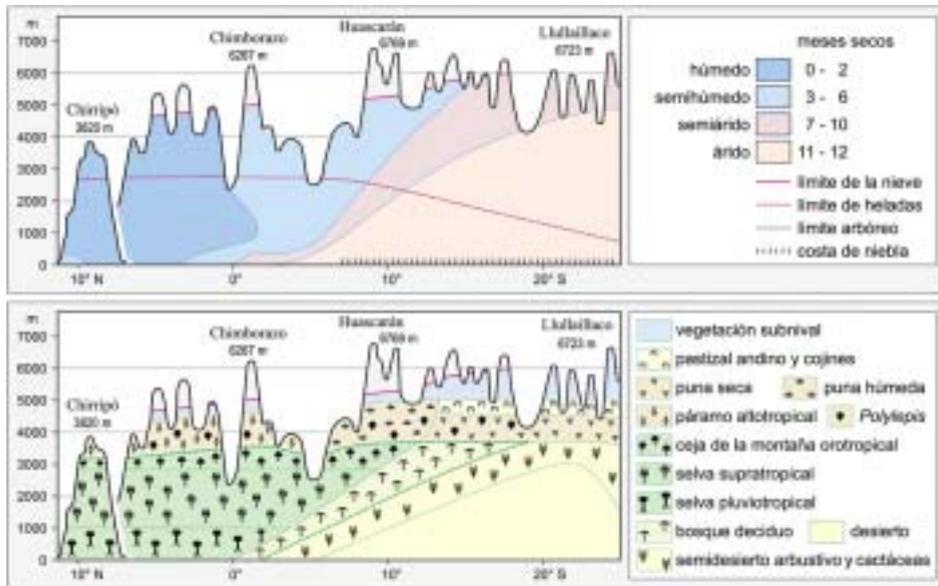


Fig. 4: Perfil meridional de humedad y pisos de vegetación para la vertiente occidental de los Andes Centrales (ver métodos para estimar humedad en Schmiedecken 1978; vegetación según Czajka 1968, Lauer 1976 y Richter 2001).

Andes ecuatoriales diluye la densa nubosidad imperante, creando el así llamado “veranillo del Niño”.

Durante todo el año, los alisios en la baja tropósfera son presionados desde el nivel de 700 hPa por vientos persistentes del E (easterlies) y son empujados al flanco andino oriental (nivel 500 hPa, Figura 3). Estos alisios son responsables de un constante ingreso de humedad en la vertiente oriental de Ecuador, el cual disminuye hacia el Sur, debido a la menor influencia de los vientos de altura. Durante el invierno, cuando los vientos del E son substituidos por vientos occidentales en la tropósfera media, en los Andes orientales de Bolivia ocurren períodos de sequía más o menos largos. Solamente en zonas específicas aparecen “islas de humedad”, como por ejemplo en el Chapare (Cochabamba, Bolivia), mientras que más al N, en los alrededores de Jaén (norte del Perú) también aparecen “islas de sequía” (ca. de 6° S, Figura 5 arriba).

Corrientes en distintos niveles de altura y anomalías por la orografía

En el punto anterior ya se expuso la importancia de las corrientes en la tropósfera media como motor de las características climáticas en los Andes Centrales. Es notable el contraste entre el componente E en las cercanías del ecuador con el componente W al sur de la zona de estudio (en 500 hPa, Figura 3). En el primer caso, los alisios del E se encargan de traer la humedad sobre la Amazonía hasta los Andes orientales; en el segundo caso son los sistemas frontales los que aportan la humedad en Chile templado (Figura 2). En ambos casos se observan importantes precipitaciones de varios miles de mm anuales en las correspondientes zonas de barlovento. Detrás de la cadena andina ocurren en cambio vientos *föhn* (vientos catabáticos secos y calientes) con efectos secantes, tanto en los valles interandinos de Ecuador (ver abajo) como en la Patagonia oriental (Argentina).

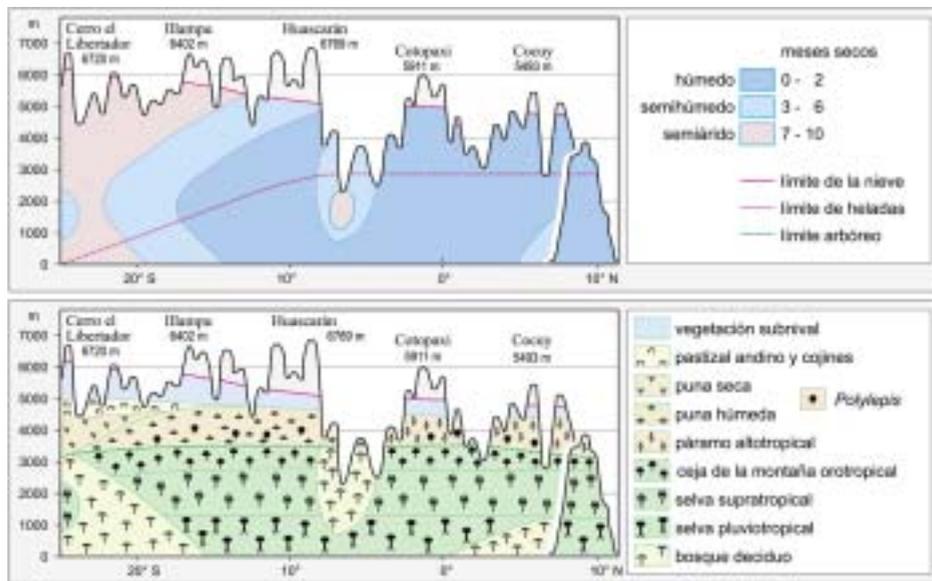


Fig. 5: Perfil meridional de humedad y pisos de vegetación para la vertiente oriental de los Andes Centrales (ver métodos para estimar humedad en Schmiedecklen 1978; vegetación según Czajka 1968, Lauer 1976 y Richter 2001).

Entre ambas corrientes contrarias y a lo largo de la cordillera ocurren turbulencias dinámicas, que causan fuertes corrientes NW en verano a lo largo del flanco oriental en el sector Sur de los Andes Centrales. En el invierno, este sector de turbulencias es fuertemente comprimido debido a que los vientos occidentales superiores se desplazan hacia el N, alcanzando incluso el ecuador en altura, en el nivel de 150 hPa (Schwerdtfeger 1961, Kreuels *et al.* 1975, Jacobeit 1992).

La figura 6 muestra cómo los sectores altos de los Andes son afectados principalmente por corrientes advectivas y “de travesía” (especialmente en 5° S). En ambas estaciones (enero y julio) las corrientes orientales sobre el Sur de Ecuador muestran su enorme influencia sobre las cimas en la depresión de Huancabamba. Aquí predomina un efecto turbina con velocidades medias mensuales del viento de 30 km/hora (8-9 m/s) en enero y hasta 34 km/hora (9-10 m/s) en julio, pues los vientos del E en 700-600 hPa, esto es a 3.000 y 4.500 m son comprimidos a través de esta depresión andina.

Asimismo, resulta interesante el abrupto cambio de las velocidades del viento en 20° S, o sea inmediatamente al S del “Codo de los Andes”. Aquí se muestra, sobre todo en enero, el ingreso de masas de aire desde el N hacia la baja presión de Cuyo a nivel de superficie (corriente de chorro baja) (en la figura 6 con isolíneas verdes frente al flanco oriental). En cambio en julio, los vientos del N soplan más débiles y a mayor altitud (chorro medio). En ambos casos se trata de masas de aire divergentes que se desprenden de la corriente frente a la muralla andina en el Perú central. Estas masas son responsables de las frecuentes lluvias en Chapare (al Centro de Bolivia). Estas corrientes son casi siempre dominantes, sin embargo, en ciertas ocasiones invernales, puede suceder una importante anomalía: el anticiclón del Pacífico Sur se desplaza hacia el Atlántico, lo que permite el ingreso de masas de aire antárticas más hacia el N. Dichas

corrientes son responsables de vientos fríos a lo largo de los Andes (surazos, friajes). Fuertes friajes han alcanzado en julio de 1975, agosto de 1978 y en 1999 hasta el oriente ecuatoriano y colombiano y marcaron hasta en 5° N (Villavicencio, Colombia) extremas de frío y de alta presión (Emck 2006, basado en NCEP/ reanálisis de datos)!

En el lado occidental de los Andes el comportamiento del viento es mucho más suave. Altas velocidades del viento se generan bajo la inversión de los alisios (1.000 a 2.000 m), pero esta corriente diaria y continua está principalmente restringida al mar y en la zona costera. Pocos kilómetros hacia el interior disminuye la influencia de los alisios, debido al roce con la superficie terrestre (bajas velocidades en contacto directo con el flanco W, figura 6).

Variación espacial climática meridional y vertical

La variación climática meridional (meridional es utilizado en sentido meteorológico, es decir, la variación Norte-Sur o Sur-Norte) ocurre en ambos lados de los Andes Centrales desde una situación húmeda en el Norte a una árida en el Sur. En la figura 7 se representa esta situación, destacando regiones con exceso hídrico y aquellas con déficit. Al mismo tiempo, es evidente que el comportamiento no es de ninguna manera sincrónico: en el lado occidental (estaciones a, f) y oriental (estaciones d, i). En el occidente domina una situación de aridez cercana a 3° S (por ejemplo en el W de Guayaquil); en cambio, en el oriente se registran regiones con un déficit hídrico anual bajo -100 cm/año en el Sur de Bolivia (19° S). Sin embargo, en el E no se alcanzan niveles tan marcados de aridez. En los altos Andes especialmente en las zonas interiores, la aridez se extiende de N a S, al abrigo de las cadenas montañosas. También la intensidad de los vientos de tipo *föhn* es decisiva para el carácter árido.

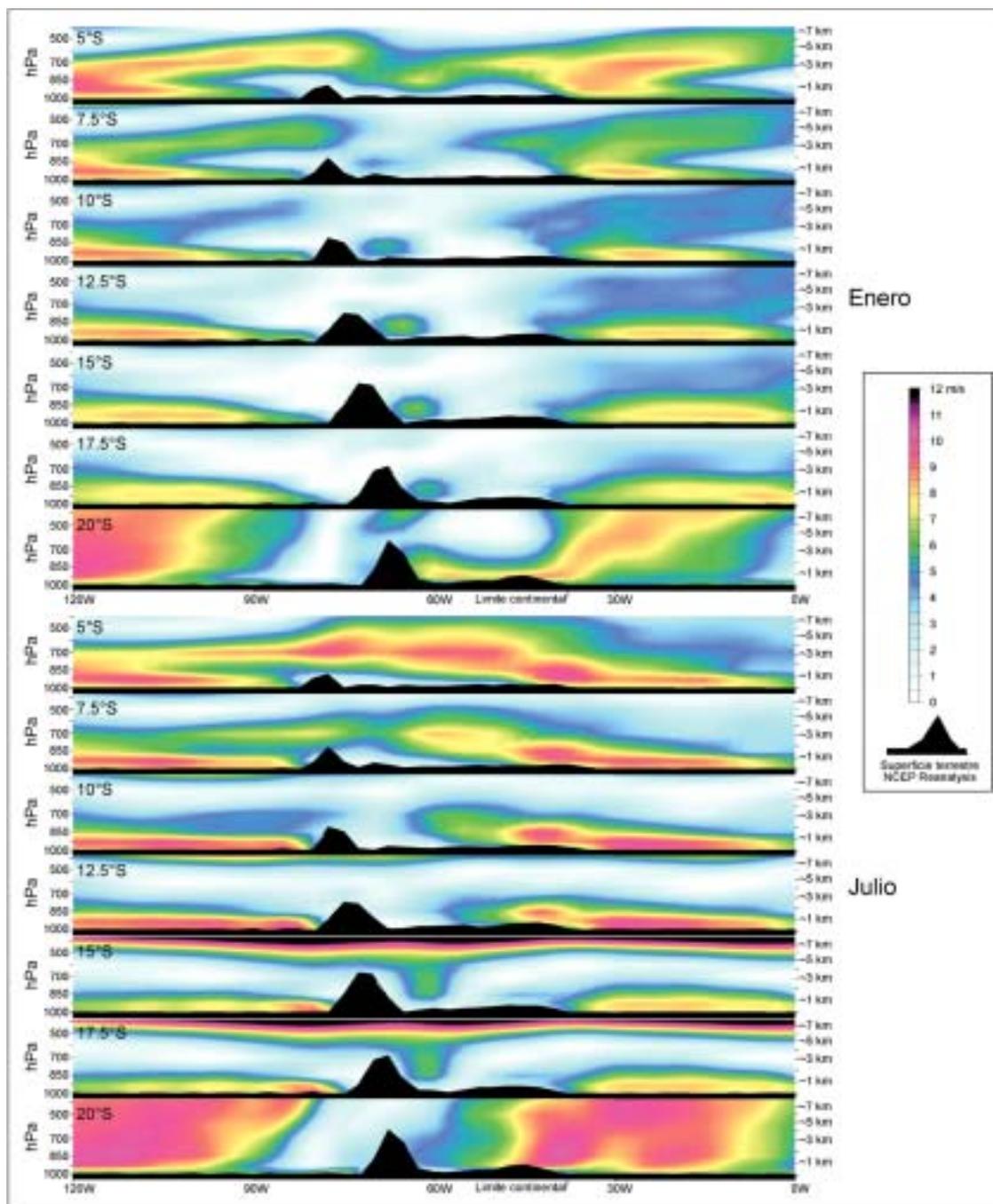


Fig. 6: Velocidades del viento en varios perfiles transversales entre 120°W y 0° sobre Sud América y los Andes en enero y julio. Datos de NCEP/NCAD-reanalysis (<http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.derived.html>)

Un gradiente de precipitación vertical predomina en montañas tropicales que muestra máximas lluvias en determinado piso altitudinal. La localización vertical de este máximo depende de la aridez/humedad y asimismo de la temperatura en la correspondiente altitud. Sobre una superficie seca y cálida las masas de aire deben subir en altitud hasta condensarse y durante este proceso una parte de la precipitación potencial se evapora en los pisos inferiores (Lauer 1975, Richter 1996). La figura 8 muestra esta situación ejemplificada con el Valle de Zongo en Bolivia, a través de los datos de la Compañía Boliviana de Energía Eléctrica SA (COBEE): sobre un piso relativamente húmedo en los alrededores de Alcoche, se une una situación máxima de 3.000 mm/año, mientras que disminuyen notablemente las precipitaciones sobre los 3.000 m. Este comportamiento es normal en los trópicos y en los Andes Centrales, debido a las precipitaciones predominantes de tipo convectivo. Sin embargo, hay excepciones como el caso de la mencionada Depresión de Huancabamba, que más se asimila a una situación extratropical como producto de masas de aire húmedas de tipo advectivo. Bajo estas condiciones es válida la regla: al aumentar la altitud, aumentan las precipitaciones hacia las máximas altitudes. Este fenómeno ha sido analizado recientemente en el sur de Ecuador y por primera vez para el Neotrópico. En la Cordillera Real las mediciones arrojan sobre 6.000 mm/año (ver diagrama Cerro del Consuelo en la figura 7) mientras que en partes más altas y expuestas las estimaciones llegan a sobre 8.000 mm/año (Emck 2006). Aquí también se diferencia el comportamiento anual de las lluvias a partir del esquema normal, mientras que en todas las otras estaciones la época de lluvias se concentra en verano (enero hasta 23°S, febrero hasta 12°S y marzo hasta 4°S, figura 7); en junio-julio el máximo de lluvias se concentra claramente en la Cordillera Real al sur de Ecuador. Éstas se producen en concordancia con los vientos fuertes del E (ver

valores de julio en figuras 3 y 6 para la zona ecuatorial), que al mismo tiempo funcionan como motor para el ingreso de largas masas de aire húmedo cerca a la superficie (Bendix & Lauer 1992).

Los diagramas climáticos en la figura 7 reflejan nuevamente el típico comportamiento hídrico en el perfil horizontal, a través de los Andes: las precipitaciones aumentan en sentido W-E, tanto en el N semihúmedo como en el S árido. En todos los casos predomina un clima diario tropical con comportamiento anual similar, excepto en la zona costera de Antofagasta donde se alcanza el límite tropical (estación f). También en las alturas se trata de un clima tropical, pues aquí tampoco se aprecian diferencias térmicas anuales, que son características de los subtropicos y extratropicos.

Esta variación espacial tiene relación con las formaciones vegetacionales, apreciable en los perfiles de las figuras 4 y 5 abajo: la zonación vertical es determinada por la disminución de la temperatura, mientras que a lo largo de los Andes Centrales el comportamiento de la humedad es el factor decisivo en la variación meridional. Un mayor contraste en la vegetación se aprecia en el flanco occidental más seco que en el oriental más húmedo y vegetacionalmente homogéneo. Se trata de una vegetación tropical que en los pisos más altos puede describirse como supra-, oro- y sobre el límite arbóreo como alto tropical (no subtropical!) (términos como "alpino" y "subalpino" son poco adecuados para regiones tropicales, Richter 2001). En relación con el límite arbóreo, se pueden diferenciar dos tipos dependientes de la disponibilidad hídrica: Mientras que en regiones semihúmedas hasta áridas predominan bosques abiertos de *Polylepis* sobre los 4.000 m, luego éstos desaparecen en situaciones perhúmedas, como en la Depresión de Huancabamba donde el límite arbóreo no sobrepasa los 3.400 m y está compuesto por diversas especies (Richter & Moreira-Muñoz 2005).

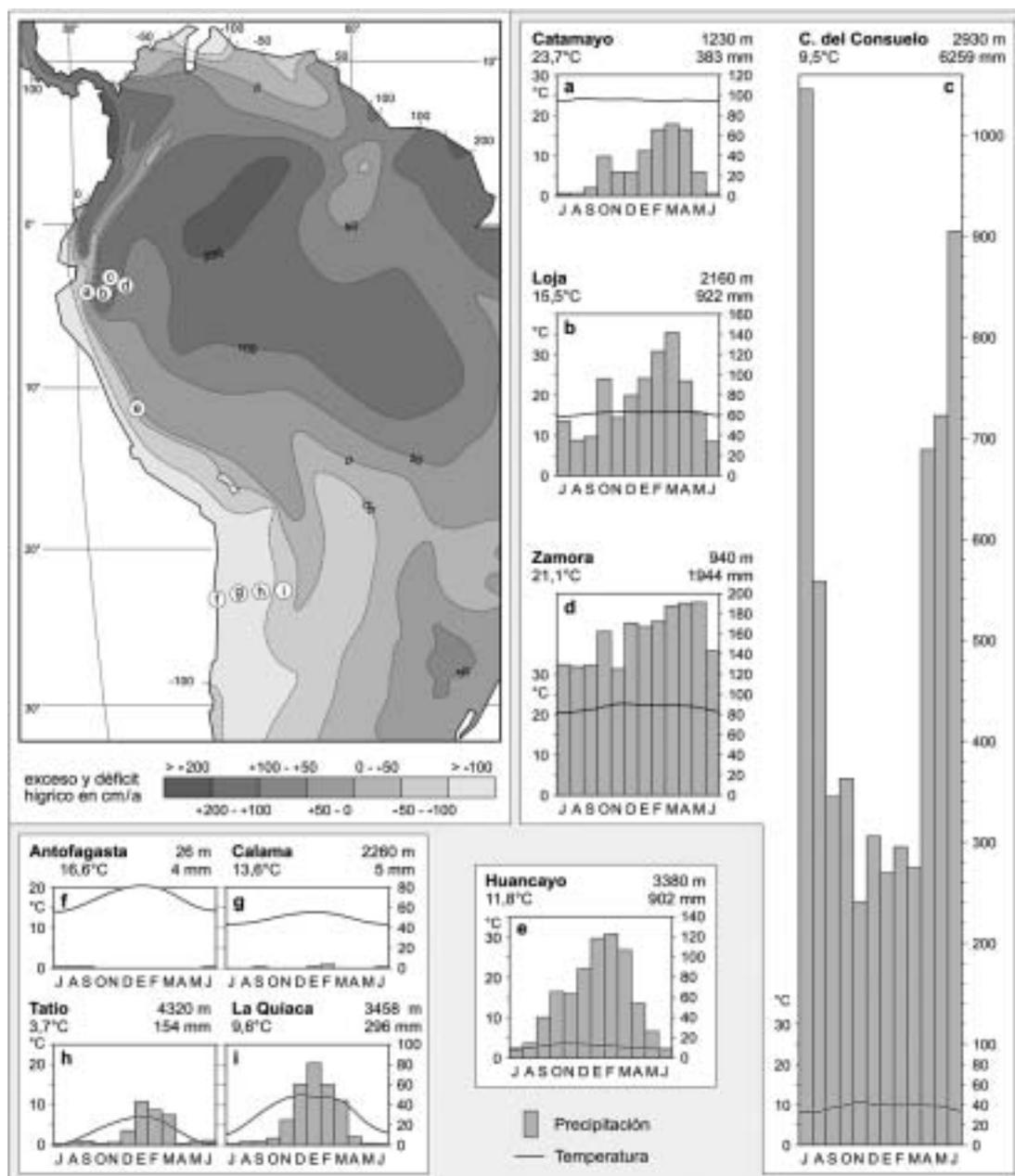


Fig.7: Carta de exceso y déficit hídricos en Sud América y diagramas climáticos de estaciones seleccionadas en el S de Ecuador (4), Perú central (1) y el N de Chile (4). La isolínea 0 representa el límite entre exceso y déficit hídrico.

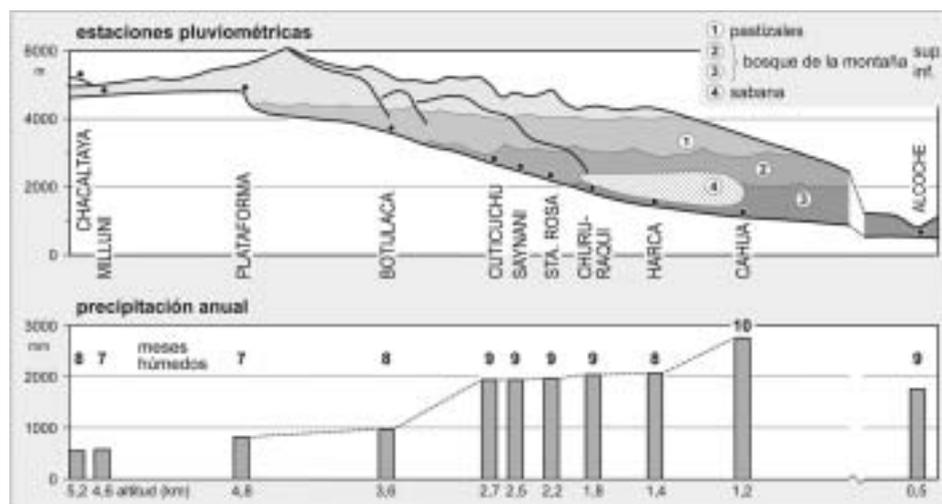


Fig. 8: Pisos de vegetación y gradiente vertical de precipitación anual en el Valle de Zongo cerca de La Paz (datos de precipitación: COBEE; ver métodos para estimar humedad en Schmiedecken 1978).

Sistemas de vientos regionales: modificadores del comportamiento de la humedad y temperatura

La situación macroclimática anteriormente descrita es modificada en muchos lugares por el sistema de vientos regional, donde el relieve tiene una función determinante. La figura 9 refleja esta situación en algunos sectores, aunque en el mapa modificado de Kistemann & Lauer (1990), seguramente faltan aún varios vientos regionales. Los vientos de valle y *föhn*s son especialmente importantes, los cuales tienen un efecto secante. Además, en muchos lugares existen sistemas de vientos costa-cordillera que afectan al flanco occidental más árido de la cordillera. Todos los sistemas mencionados son especialmente efectivos durante el día, por lo siguiente:

- Sistemas de viento ladera-valle son muy comunes en los Andes Centrales y siguen el mismo principio de cambio entre el día y la noche en todas las zonas montañosas. Al interior de los valles ocurre una concentración de las masas de aire

húmedas, sobre todo en sectores estrechos y por lo tanto se favorece el desarrollo de una vegetación higrófila. Los valles abiertos son relativamente secos donde las masas de aire se disipan y por lo tanto, la vegetación muestra un carácter más bien xerófilo.

- Estos sistemas de ladera-valle se intensifican en valles que cortan cadenas montañosas y en planicies altas. Bajo estas condiciones de relieve en que la superficie se calienta durante el día, las masas de aire son fuertemente atraídas hacia las tierras bajas, de forma que el valle es afectado por vientos fuertes y secos. Este fenómeno ampliamente distribuido ha sido descrito para los valles de Charazani y Consata en Bolivia (Richter & Lauer 1987). Seguramente es lo que afectó al climatólogo y geobotánico Carl Troll en el valle del Río La Paz, donde perdiera gran parte de su herbario debido al fuerte viento (Monheim 1985).
- Un sistema relativamente mayor lo forman los vientos costa-cordillera en el flanco



Fig. 9: Vientos regionales en los Andes Centrales (modificado de Kistemann & Lauer 1990).

cordillerano occidental (Richter & Schmidt 2002). Estos son especialmente fuertes en el sur de Perú y norte de Chile, donde predominan planos levemente inclinados y poco cortados, pero sometidos a grandes diferencias altitudinales. Esta situación se repite en los altiplanos de Imata, La Paz, Uyuni y también en la cordillera de Atacama. En este caso, se trata del efecto de succión de las masas de aire derivadas de los alisios que vienen desde el mar. Debido a la relativamente amplia distancia costa-piedemonte, la humedad transportada por el aire marino alcanza a

la cordillera pasado el mediodía hasta la tarde, esto es antes de que el viento cambie de dirección cordillera-costa (Schmidt 1999).

- Capas de nubes cruzan las crestas liberando vientos catabáticos cálidos y secos, donde las cadenas andinas son más bajas y no actúan como muro bloqueando el ingreso de masas de aire húmedo. Estos *föhns* son especialmente fuertes en la parte ecuatorial de la Depresión de Huancabamba, donde los vientos catabáticos pueden soplar sobre los valles interandinos desde ambos lados, es decir

tanto desde la Cordillera Oriental (C. de Celica) como desde la Cordillera Occidental (C. Real).

Hay vientos catabáticos que sólo tienen importancia local, y son aquellos que llevan aire frío a las regiones bajo glaciares, lo cual genera leves depresiones en los pisos superiores. Este fenómeno de vientos glaciares ocurre sobre todo en la Cordillera Blanca en Perú.

Complejidad higrotérmica y diversidad de las formaciones vegetacionales en el Sur del Ecuador

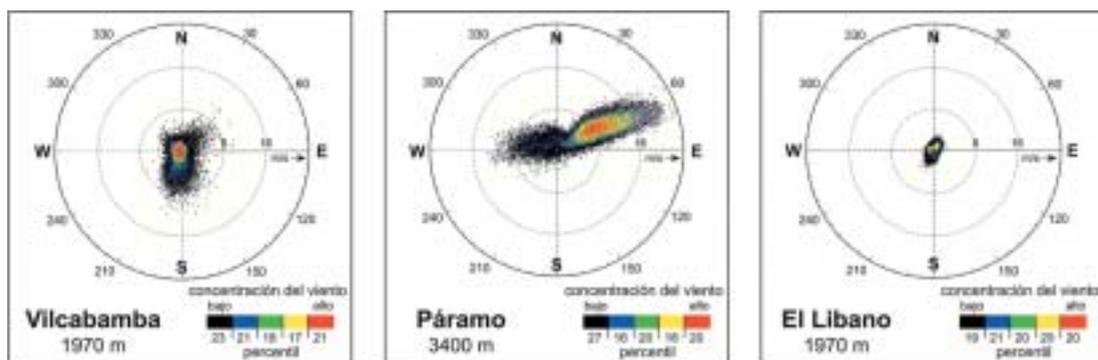
Dependiendo de la forma del relieve, se pueden diferenciar en los Andes Centrales dos tipos climáticos: Una complejidad higrotérmica muy heterogénea donde los Andes están conformados por dos o más cadenas montañosas y sus valles interandinos, mientras que una estructura de relieve más simple determina un sistema climático más homogéneo.

El tipo heterogéneo es el que predomina en el sur de Ecuador, donde se advierte una alta diversidad climática en espacios reducidos (Richter 2003, Emck 2006). Estos diferentes climas locales se aprecian en la figura 10, donde se representan las diferencias entre estaciones de barlovento y sotavento en el S de Ecuador (Zamora-El Libano y Vilcabamba, respectivamente, ambas a 1.970 m). Dichas estaciones distan solamente a 30 km y están separadas por la Cordillera Real, que alcanza una altitud máxima de 3.600 m (estación Páramo a 3.400 m, figura 10). La vertiente oriental húmeda con lluvias de hasta 3.000 mm/año y una temperatura media anual de 15.6°C contrasta con la vertiente occidental más seca que recibe cerca de 1.000 mm/año y muestra una temperatura media de 18.3°C. También se aprecian marcadas diferencias en la humedad del aire: en el E alcanza un máximo medio de 97% a las 5:00 am en el período más húmedo (marzo-julio) y una humedad media mínima

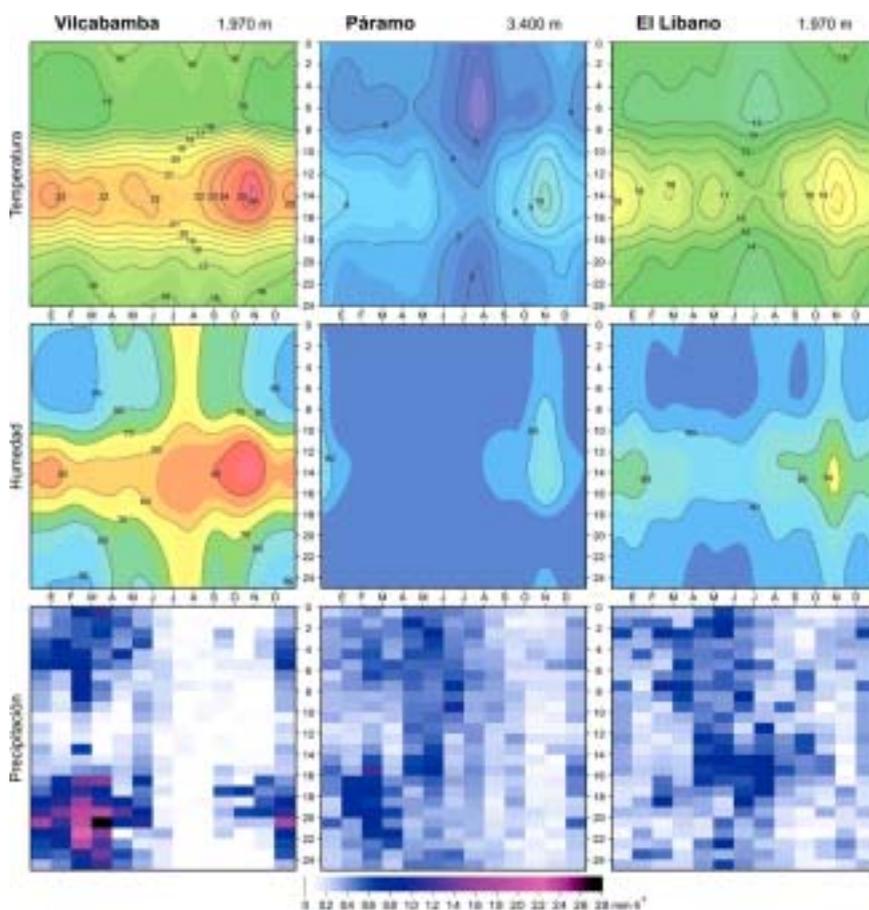
de 77% a las 2:00 pm en el mes más seco (noviembre). Comparativamente en el occidente, los valores para la media máxima alcanzan 93% a las 6:00 am en el mes más húmedo (febrero) y apenas un 43% a las 2:00 pm en el período más seco (octubre-noviembre). En ambos casos, las lluvias son principalmente de tipo convectivo, que caen sobre Zamora durante el invierno austral pasado el mediodía y sobre Vilcabamba durante el verano austral en la tarde. La influencia del viento en el E es muy débil, mientras que en el occidente los *fóhms* del E acentúan la sequedad, sobre todo durante los períodos lluviosos. En cambio el clima de altura marcadamente frío y húmedo de la estación Páramo es determinado por las masas de aire advectivas del E y por lluvias durante todo el año. Éstas se ven solamente interrumpidas en octubre-enero durante algunos días despejados del veranillo del Niño. En el caso de Vilcabamba, que es más seco que las otras dos estaciones, las lluvias convectivas en marzo-abril provocan aguaceros vespertinos de alta intensidad (figura 10 b).

Este contraste W-E - que ocurre en un espacio reducido - se ve destacado en las cartas climáticas y de vegetación (figuras 11 y 12). La diversidad de temperaturas en el perfil vertical entre la tierra cálida y la subhelada es fortalecida en latitud por contrastes higróscopos. Un bolsón seco se aprecia en la cuenca de Catamayo, que a pesar de su altitud (1.230 m), con una temperatura media anual de 24.7°C, se puede clasificar como pequeño *hotspot* de tierra caliente. Su posición se debe a una doble protección, tanto desde el W como desde el E por la presencia de la Cordillera Occidental y Oriental, así como por las tierras interandinas, las que muestran un estrecho mosaico de sitios altos, fríos y húmedos entre sitios de valle secos y cálidos.

La complejidad del clima se expresa naturalmente en la diversidad de las formaciones vegetacionales (Richter & Moreira-Muñoz 2005, figura 12). El bosque semidecídulo montano ocupa una mayor superficie y ha sido en gran parte transformado en matorrales de



a)



b)

Fig. 10: Contraste climático en la Cordillera Real al S de Ecuador: a) rosa de los vientos con información de velocidad y dirección del viento; b) isolíneas de temperatura y humedad relativa del aire, así como distribución anual y diaria de las lluvias, en estaciones climáticas de sotavento (Vilcabamba), en la cima (estación Páramo; no corregidas por el viento) y en barlovento (Zamora-El Líbano).

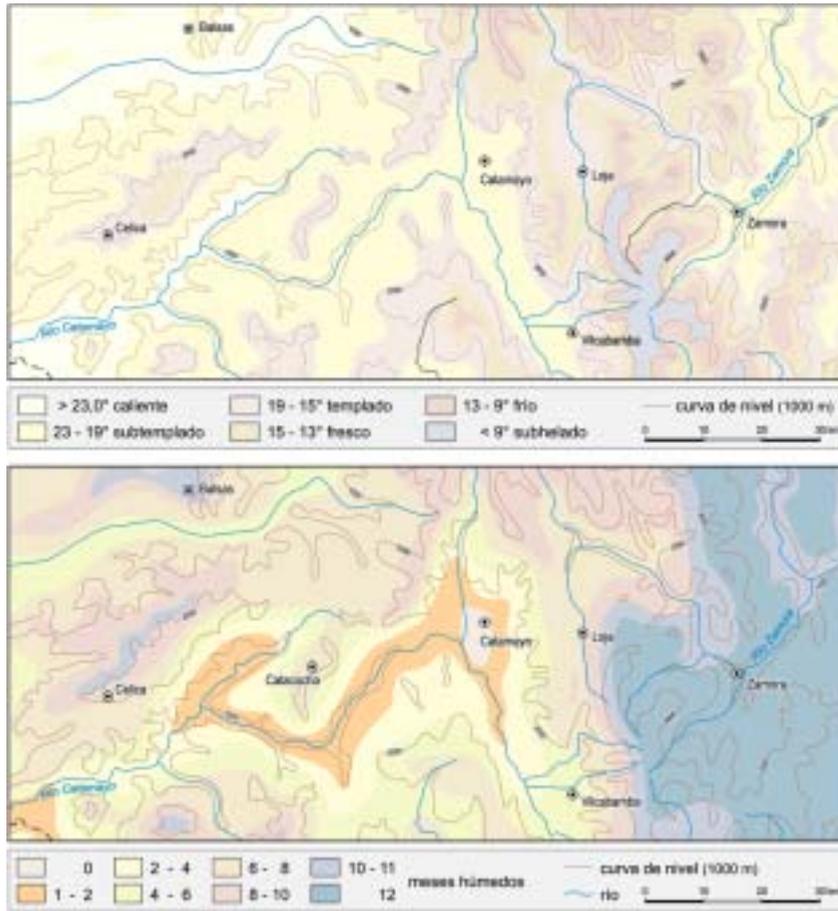


Fig. 11: Diferencias de temperaturas y humedad en el S de Ecuador (humedad según Richter 2003).

influencia humana. En la imagen de satélite resaltan estos parches de matorral en tono gris. En esta formación dominan las especies arbóreas *Acacia macracantha*, *Capparis scabrida*, *Ceiba insignis* y *Tabebuia chrysantha*. Esta formación actúa como transición entre el bosque semidecíduo ralo de colina en la frontera con Perú (en el cual dominan *Ceiba trichistandra*, *Cochlospermum vitifolium*, *Bursera graveolens* y *Loxopterygium huasango*) y el bosque siempre verde montano. Junto a la ceja de la montaña se pueden distinguir en varios pisos afectados por la neblina y caracterizados por diferentes especies arbóreas de los géneros *Clusia*, *Ilex*,

Miconia, *Palicourea*, *Symplocos*, *Weinmannia*, así como *Ocotea* y *Persea* en los pisos inferiores. Así como los bosques lluviosos son extremadamente ricos en musgos, los páramos de altura se muestran extremadamente diversos en plantas vasculares, especialmente en especies de los géneros *Bomarea*, *Brachyotum*, *Chusquea*, *Disterigma*, *Elaphoglossum*, *Gaultheria*, *Lycopodium*, *Mikania* y *Puya*. El bosque pluvial siempreverde oriental se caracteriza por los géneros *Beilschmiedia*, *Cecropia*, *Ficus*, *Guarea*, *Ladenbergia*, *Leonia* y *Terminalia*, así como palmas en los géneros *Ceroxylon*, *Euterpe*, *Iriarte* y *Oenocarpus*, de carácter amazónico.

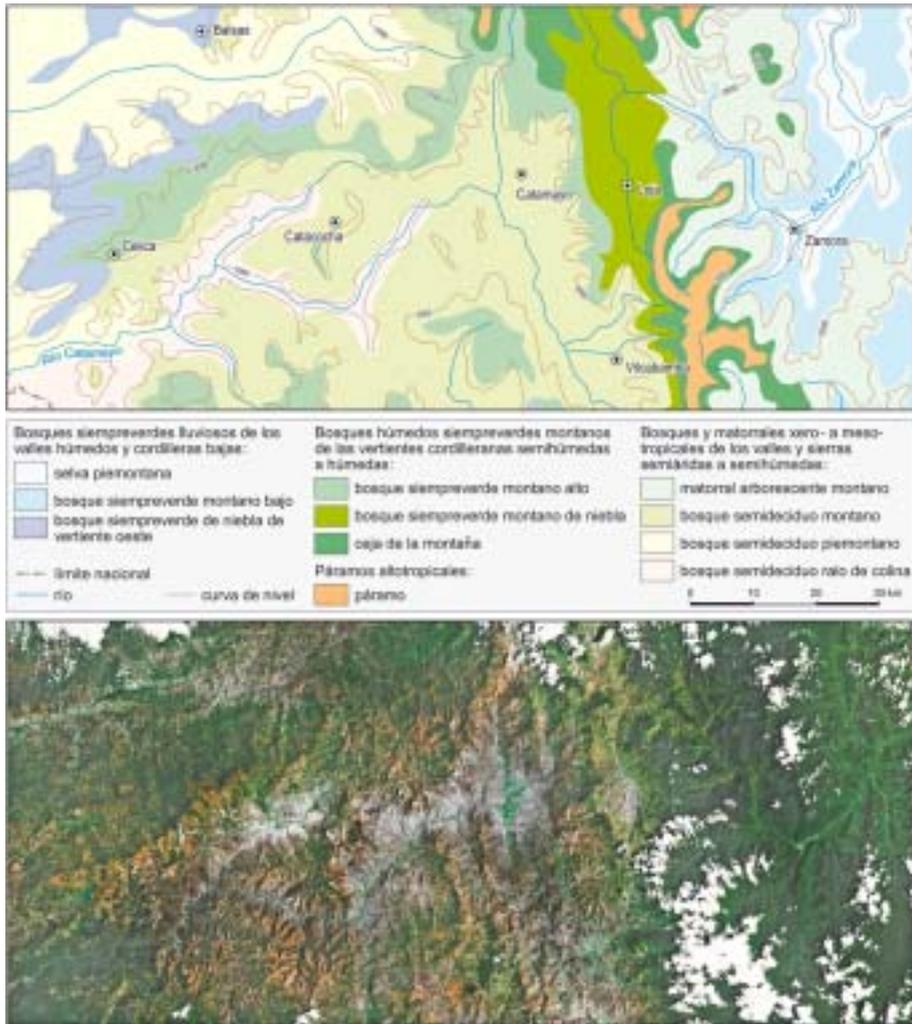


Fig. 12: Formaciones de vegetación potencial e imagen de satélite del Sur de Ecuador (Vegetación según Richter & Moreira-Muñoz 2005; imagen de satélite: www.maps.google.com).

Complejidad higrotérmica y diversidad de las formaciones vegetacionales en el Sur de Perú

Mucho más simple y homogénea se muestra la variación climática y vegetacional en la costa árida de la vertiente suroccidental de los Andes Centrales en el sur de Perú (Richter 1981), donde el relieve volcánico aumenta gradualmente en altura desde la costa Pacífica

hacia el NE, rematando en una gran muralla de altura. Dos de los tres valles principales forman profundos cañones (Río Colca y Río Tambo) y muestran diferencias térmicas marcadas en una corta distancia (figura 13a). Aquí predominan también fuertes vientos en las superficies cálidas de las altiplanicies.

La variación térmica e higríca es continua de abajo hacia arriba. En la costa el régimen de temperaturas se muestra relativamente frío,

debido a la influencia de la corriente de Humboldt. Esta región se caracteriza sobre todo en invierno por la presencia de neblinas constantes hasta cerca los 1.000 m. Las neblinas pueden ingresar bien al interior en los valles, aunque disminuyen en intensidad, creando pequeños espacios más cálidos a lo largo de los ríos Colca y Tambo que corresponden a la tierra sub templada a templada (figura 13a arriba). Luego se da un paulatino enfriamiento hasta las mayores altitudes, entre las que se cuenta el Nevado de Ampato con 6.288 m. La isolínea de 0°C de la temperatura media anual se encuentra casi exactamente a los 5.000 m. En la costa se observan pocas variaciones de la temperatura diaria, que en Mollendo sólo alcanzan 3.1°C en agosto y 5.5°C en enero, debido a su carácter marítimo. Sin embargo, en el sector continental de Imata a 4.463 m las diferencias diarias pueden alcanzar 32.2°C en agosto y 21.3°C en enero. Recién en los alrededores del Lago Titicaca se encuentran nuevamente valores menos extremos (Richter 1981).

A la par con las efectivas neblinas, la costa recibe también lluvias pero poco frecuentes y escasas bajo 5 mm/año. También en Arequipa, a 2.518 m predomina la sequedad con cerca de 90 mm/año. El 90% de la precipitación cae en invierno (Holmgren *et al.* 2001), debido a las corrientes del N a lo largo de los Andes orientales que sobrepasan las cadenas montañosas hacia el W. Recién sobre los 3.000 m se encuentra un mes húmedo al año, mientras que en Imata son cuatro los meses húmedos (570 mm) y en la ribera N del Lago Titicaca con cerca de 900 mm, pueden ser hasta nueve (figura 13a abajo).

La paulatina variación climática determina una simple zonación altitudinal de la vegetación (figura 13b). La vegetación de lomas se localiza entre 150 y 1.000 m en los sectores de mayor neblina, predominando una diversidad de pterófitas pertenecientes a los géneros *Jaltomata*, *Lycopersicon*, *Nolana*, *Palaua* y *Polyachyrus*, con la presencia constante de la

gramínea *Eragrostis peruviana*. Los arbustos más frecuentes son *Carica candicans*, *Calliandra prostrata*, *Frankenia chilensis*, *Gaya pilosa* y *Lycium stenophyllum*, mientras que en lugares más altos aparecen los cactus: *Neoraimondia arequipensis* y *Haageocereus decumbens*, así como *Tillandsia straminea* sobre sustrato arenoso. Hasta los 2.400 m domina un desierto hiperárido, el cual luego es reemplazado por un matorral de arbustos xerófilos como *Adesmia spinosissima*, *Ambrosia fruticosa*, *Encelia canescens*, *Krameria lappaceae*, *Tarasa operculata* y diversos cactus, por ejemplo *Weberbauerocereus weberbaueri*. Desde los 3.300 m hasta 4.000 m domina una formación arbustiva (tolar) con *Anatherostipa obtusa*, *Baccharis tricuneata*, *Parastrephia lepidophylla* y *P. quadrangularis*, así como *Tetraglochin strictum*, que en altura se transforma en una puna de gramíneas con *Festuca orthophylla* y *Jarava ichu*. También aparecen aquí queñuales relictos de *Polylepis incana* y *P. rugulosa*, así como *Buddleja coriacea*. A mayores altitudes y por encima de los 5.000 m, se caracterizan por la presencia de caméfitas de los géneros *Azorella*, *Baccharis*, *Fabiana*, *Nototriche*, *Senecio*, *Valeriana* y *Werneria*, entre ellas los cojines de “yareta” (*Azorella compacta*), „inka roca” (*Opuntia floccosa*) y del „ayro” (*Pycnophyllum molle*). En la imagen de satélite se aprecia el paulatino reemplazo del desierto hiperárido por las formaciones arbustivas en un gradiente SW-NE.

El tipo de clima relativamente homogéneo y su correspondiente transición vegetacional corresponden a un flanco cordillerano occidental poco sinuoso, de origen volcánico y cortado por pocos, aunque profundos valles. En cambio, la vertiente oriental es mucho más rica en valles de origen fluvio-glacial. Esta vertiente es más abrupta y geológicamente heterogénea, de forma que genera condiciones locales diferenciadas de humedad y por lo tanto, una mayor diversidad de ecosistemas, formaciones vegetacionales y especies.

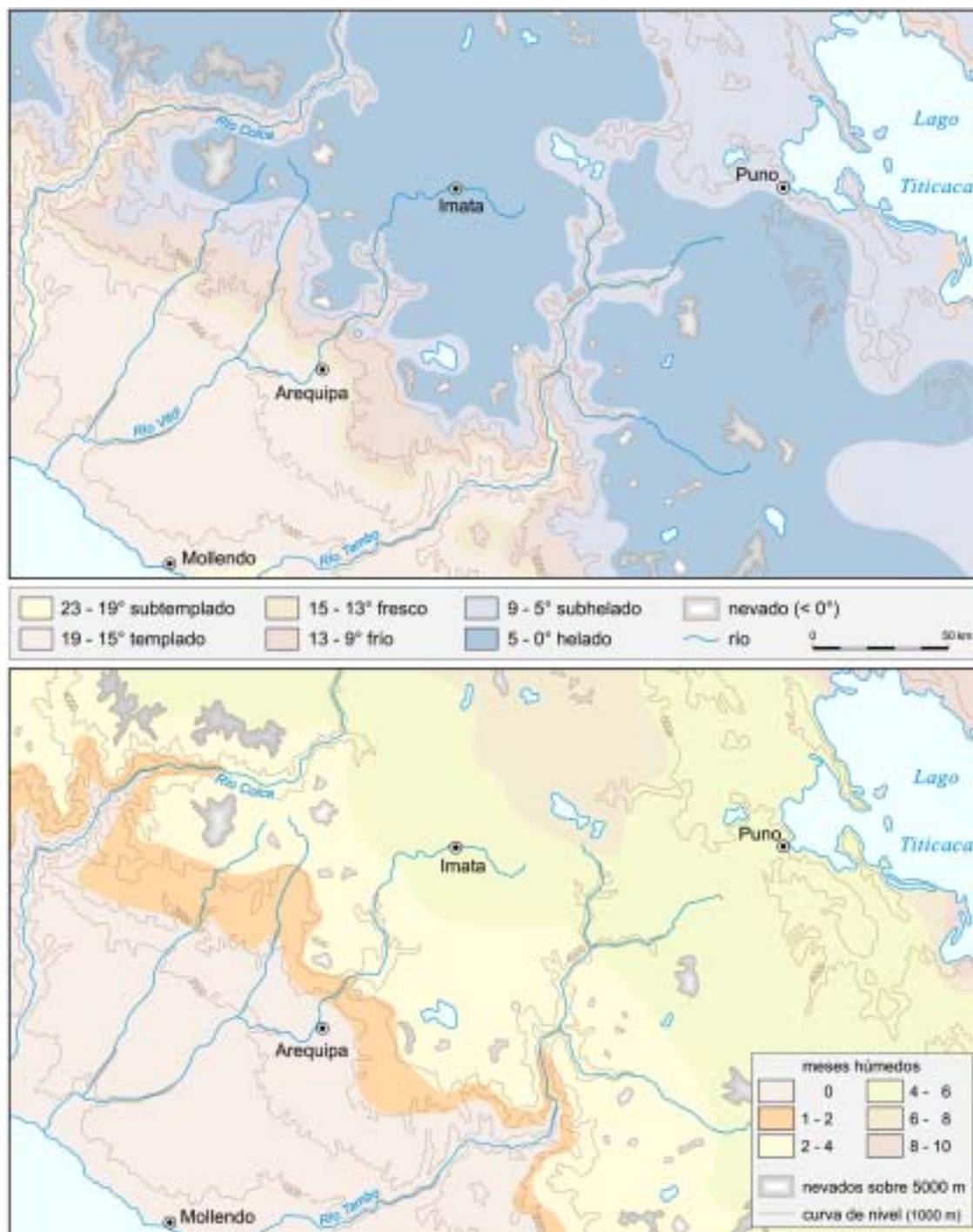


Fig. 13a: Diferencias de temperaturas y humedad en el S del Perú (humedad según Richter 1981).

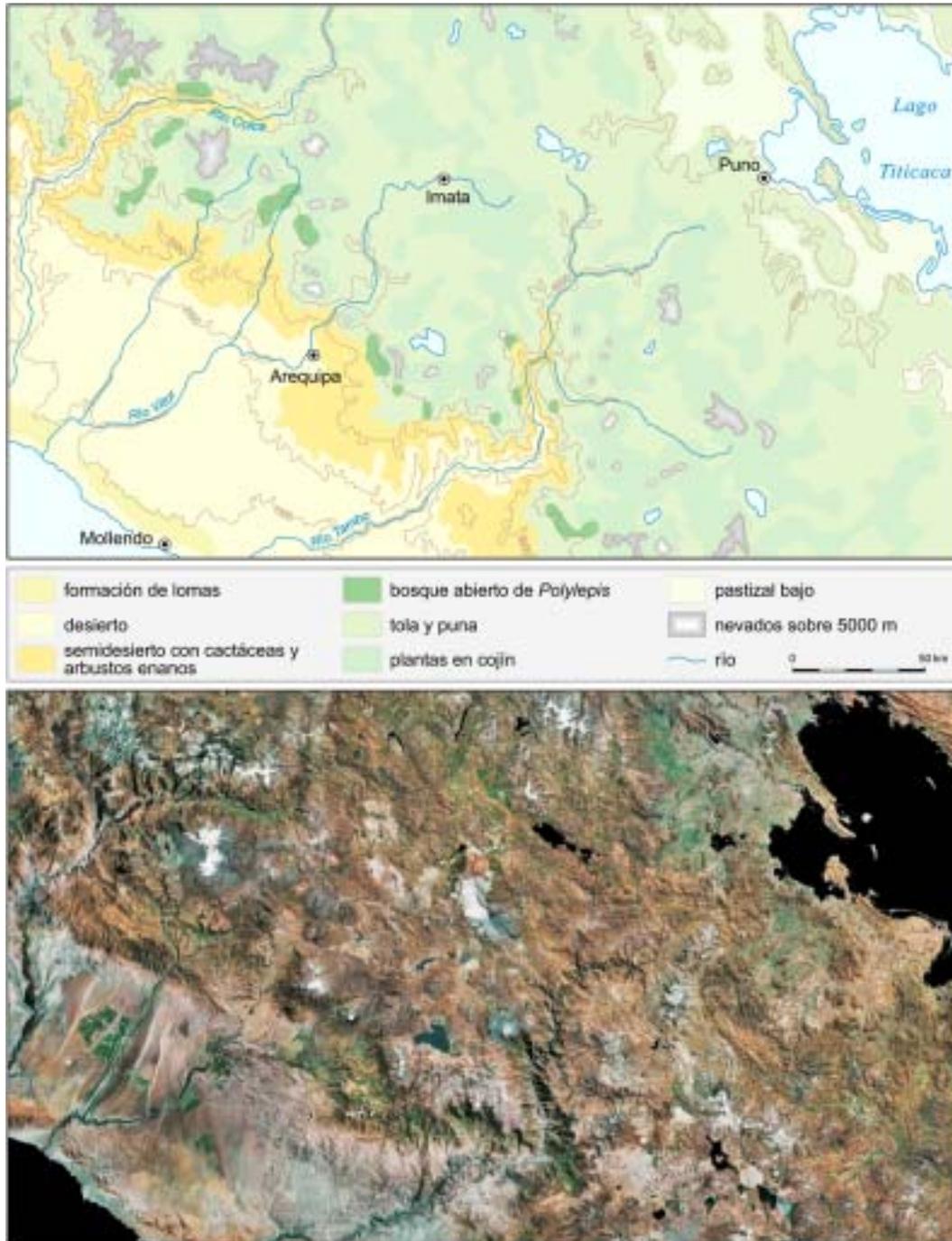


Fig. 13b: Formaciones de vegetación potencial e imagen de satélite del Sur de Perú (Vegetación según Richter 1981; imagen de satélite: www.maps.google.com).

Algunas características microclimáticas y sus efectos sobre la vegetación

Diferencias diarias de la temperatura del aire superiores a 30°C, como en el caso de Imata, llevaron a Troll (1959) a declarar que en los sectores más secos de los Andes Centrales se encontraría a escala mundial el mayor déficit microtérmico para el crecimiento de las plantas. Precisamente en los lugares de puna sometidos a una alta radiación solar, la germinación y crecimiento de las plantas predominantes que son rosetas y cojines, se ven dificultados por dichas variaciones extremas de temperatura y baja humedad del aire menor al 5%. El crecimiento es lento y funciona en muchas especies sólo durante la mañana y a media tarde, entre las fases de heladas nocturnas y sobrecalentamiento diurno. La baja productividad genera una transformación desde la forma cilíndrica original hasta los cojines radiales y rosetas enanas de hojas pequeñas y en una superficie compacta. La disminución resultante de la superficie de transpiración constituye una protección frente a las altas temperaturas, el viento y la alta evaporación (Rauh 1978).

El comportamiento microtérmico extremo de superficie ha sido documentado para los sectores desérticos de los Andes Centrales en el límite chileno-boliviano, en la cordillera de San Pedro de Atacama: Se registraron mediciones diarias a 4.250 m sobre suelo oscuro de cenizas con fragmentos de pastizal, que para enero y en relación a una intensa radiación se presenta una amplitud máxima de casi 90°K (-14.7°C a las 7:00 am hasta 74.7°C a las 2:20 pm) y en julio sobre 65°K (-20.2°C a las 7:30 am hasta 47.1°C a las 2:00 pm). Similar comportamiento y en esta zona de altura, muestran las termo-isolíneas en la figura 14. Aquí se aprecia que a una menor altitud (Talabre a 2.950 m, 23°22' S, 67°50' W) el calentamiento de la superficie del suelo es igual de fuerte que en lugares más altos (Tumbre a 4.250 m, 23°21' S, 67°47' W), aunque la influencia de las heladas nocturnas es menor en lugares

de menor altitud. A menor altitud, el crecimiento de las plantas se ve limitado por la menor precipitación (según Schmidt 1999, cerca de 40 mm/año, en contraste con 200 mm/año a mayor altitud). También se muestran claras diferencias en la humedad relativa del aire, que en sitios altos presenta mayores valores que en los bajos, donde los valores mínimos diarios permanecen bajo un 5% por muchas horas (Talabre, figura 13).

El límite chileno-boliviano en los Andes es reconocido como la región que recibe la mayor cantidad de radiación solar en el mundo. Sin embargo, similares valores se han medido recientemente en el sur de Ecuador, que corresponde a uno de los lugares más húmedos del planeta. A una altitud de 3.400 m se midió un máximo de 1.832 W/m² y similares mediciones de radiación global en sectores cercanos confirman este valor extremo. Esta radiación actúa sólo por pocos minutos, al unirse una radiación difusa muy potente a la radiación directa. El motivo es la posición vertical del sol, la atmósfera limpia y varias capas de nubes en que la radiación de onda corta se refleja sin perder mucha de su intensidad. Las plantas no muestran características especiales en su forma de crecimiento como en caso de los Andes áridos, debido a que esta sobredosis de radiación es relativamente limitada en un ambiente siempre húmedo. Muchas especies de plantas protegen principalmente sus nuevos tejidos mediante una fuerte producción de carotina, la cual es responsable del color rojo en los tejidos de la hoja.

En un contexto microclimático se pueden representar estas condiciones de radiación especiales también como termo-isolíneas. En la figura 15 se representa con el ejemplo de agosto una situación normal, en que hay una amplitud diaria extremadamente baja de máximo 3°K. Las diferencias de temperatura en las superficies por encima de 30°K pueden aumentar solamente luego de varios días de tiempo seco con viento del NW, siempre que el suelo

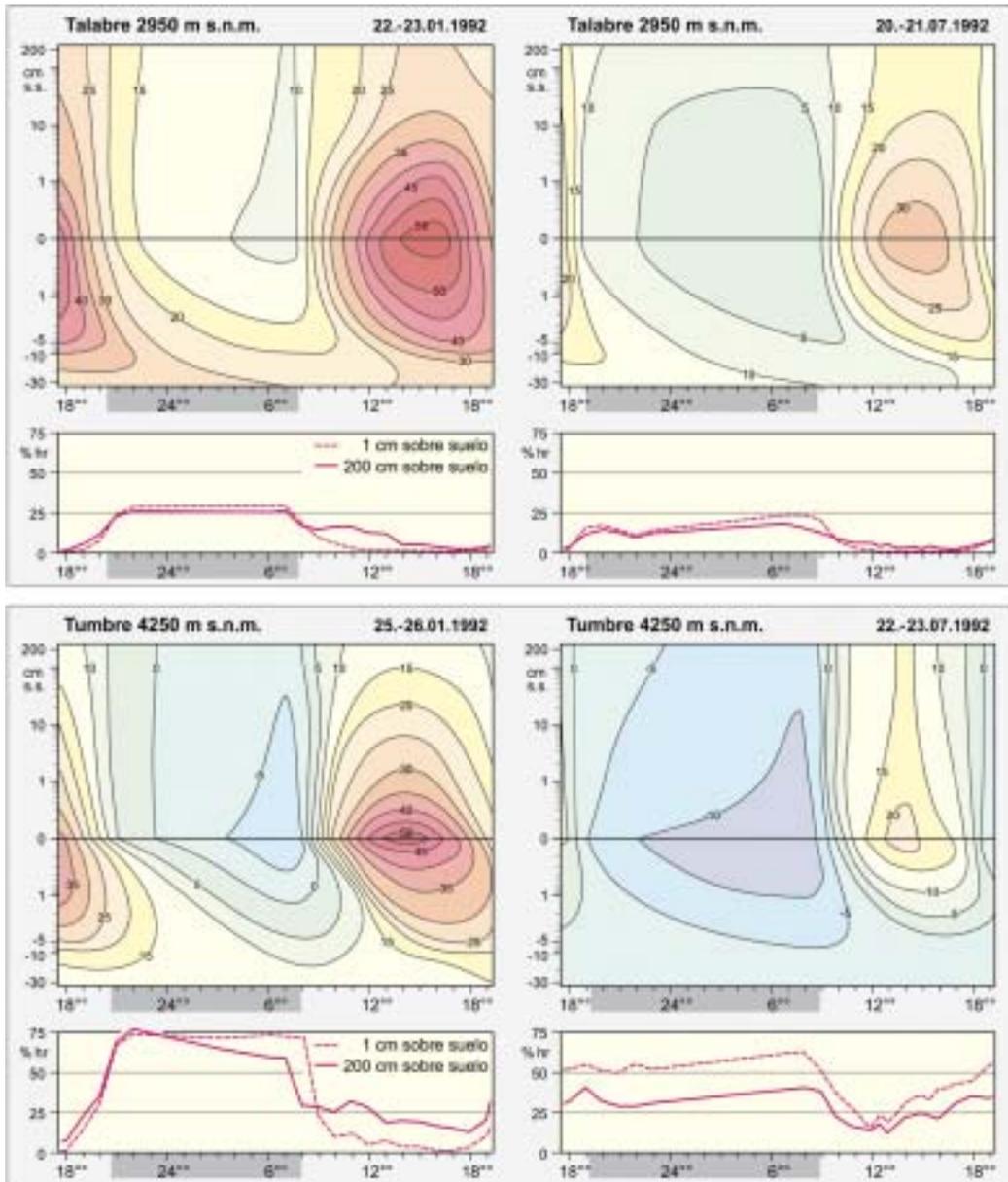


Fig. 14: Diagrama de termo-isolneas y humedad relativa del aire a partir de mediciones diarias con tiempo despejado en dos localidades de la Cordillera de Atacama en enero y julio 1992 (escala logarítmica para los centímetros sobre y bajo la superficie del suelo).

superficial esté relativamente seco (en diciembre, típico caso de “veranillo del Niño”, figura 14). En estos casos excepcionales, la humedad relativa del aire puede bajar hasta 50% (mínimo absoluto de 12.6% en 2 m sobre el suelo).

Breve reseña acerca del estado del conocimiento geobotánico en los Andes centrales

Los Andes Centrales han sido objeto de estudios climáticos y vegetacionales desde los inicios de la ciencia geobotánica. Basta recordar que los inicios de esta disciplina están indisolublemente ligados a la incursión de Alexander von Humboldt y Aimé Bonpland en estos territorios entre 1802 y 1803. Aunque las primeras notas botánicas y colectas de plantas en Ecuador habían sido realizadas ya en el siglo anterior por Charles-Marie de La Condamine (1736-

1743) y por el ilustre botánico Joseph de Jussieu (1735-1747). Podemos decir por ende que los Andes Centrales han sido el punto de partida de la geografía botánica como ciencia moderna. Sólo como ejemplos del paulatino avance del conocimiento florístico y vegetacional podemos citar los pioneros trabajos de Philippi (1860) en la cordillera de Atacama, Weberbauer (1911) en Perú, Herzog (1923) en Bolivia o Diels (1937) en Ecuador. Entre los más actuales cabe destacar las obras de Navarro & Maldonado (2002) para Bolivia y Luebert & Plissock (2006) para Chile. A pesar de ello, las investigaciones más recientes no hacen más que demostrar que aún falta mucho por conocer, puesto que los Andes Centrales son uno de los centros de biodiversidad más importantes del planeta, pero aún muestran enormes vacíos de información (Beck 2001, Kessler 2003). En este sentido es deseable y urgente potenciar la investigación de detalle en regiones aún poco

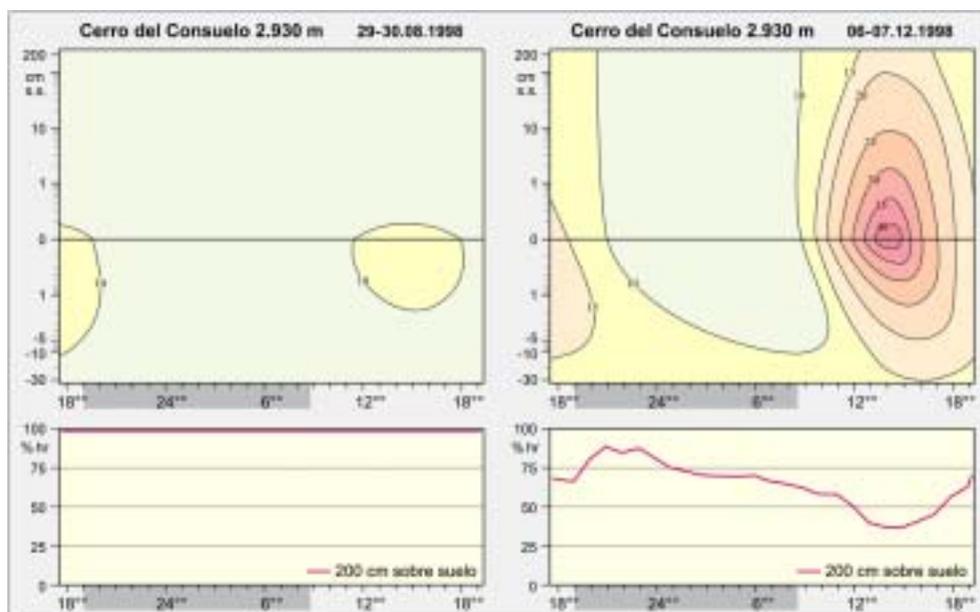


Fig. 15: Diagrama de termo-isolneas y humedad relativa del aire a partir de mediciones diarias con lluvia (situación normal) y tiempo despejado (situación particular) en un lugar de la Cordillera Real en agosto y diciembre 1998 (escala logarítmica para los centímetros sobre y bajo la superficie del suelo).

exploradas como el sur de Bolivia y el norte del Perú. Sólo recientemente el sector de la depresión de Huancabamba ha empezado a ser explorado más intensamente, arrojando interesantes novedades botánicas y biogeográficas para las familias Campanulaceae (Ayers 1999), Loasaceae, Passifloraceae, Grossulariaceae, Urticaceae (Weigend 2004, Weigend *et al.* 2005) y Calceolariaceae (Andersson 2006). Ello ha permitido fundamentar con mayores antecedentes la importancia de la zona como un centro de diversidad florística, tanto a escala continental (Young & Reynel 1997) como global (Mutke & Barthlott 2005). En la medida que se favorezca la investigación en el norte del Perú y el sur de Bolivia, es esperable también el descubrimiento de interesantes fenómenos climáticos y vegetacionales, estrechamente ligados a la riqueza biológica de esta singular y aún poco conocida zona del planeta.

Agradecimientos

Varios aspectos del trabajo han sido desarrollados en el marco del proyecto "Funcionalidad de un bosque tropical lluvioso montañoso del sur de Ecuador: El ecosistema con su biodiversidad, sus procesos dinámicos y el uso potencial del mismo" (<<http://www.bergregenwald.de/>>). Paul Emck y Michael Richter agradecen a la DFG (Fundación Alemana de Investigación) por el generoso apoyo financiero. Andrés Moreira-Muñoz agradece el apoyo del Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD). Sergio Moreira prestó una ayuda fundamental en la traducción del manuscrito original. Se agradece especialmente a Mónica Moraes por la invitación a escribir el presente capítulo.

Referencias

- Andersson, S. 2006. On the phylogeny of the genus *Calceolaria* (Calceolariaceae) as inferred from ITS and plastid matK sequences. *Taxon* 55(1):125-137.
- Ayers, T. 1999. Biogeography of *Lysipomia* (Campanulaceae), a high elevation endemic: An illustration of species richness at the Huancabamba Depression, Peru. *Arnaldia* 6: 13-28.
- Beck, S. G. 2001. Floristic inventory of Bolivia – An indispensable contribution to sustainable development. En: Barthlott, W. & M. Winiger (eds.) *Biodiversity – A Challenge for Development Research and Policy*. Edit. Springer Berlin, Heidelberg. Pp. 243-267.
- Bendix, J. & W. Lauer. 1992. Die Niederschlagsjahreszeiten in Ecuador und ihre klimadynamische Interpretation. *Erdkunde* 46: 118-134.
- Czajka, W. 1968. Los perfiles vegetales de las cordilleras entre Alaska y Tierra del Fuego. *Coll. Geogr.* 9: 117-121.
- Diels, L. 1937. Beiträge zur Kenntnis der Vegetation und Flora von Ecuador. Edit. E. Schweizerbart, Stuttgart, 190 p.
- Emck, P. 2006. A climatology of South Ecuador. Tesis PhD Universidad de Erlangen. 272 pp.
- Endlicher, W., Habbe K.A. & H. Pinzner. 1990. Zum El Niño-Southern Oscillation-Ereignis und seinen Auswirkungen im peruanischen Küstengebiet. *Mitt. D. Fränkischen Geograph. Gesellschaft* 35/36: 175-201.
- Graf, K. 1986. Klima und Vegetationsgeographie der Anden. *Physische Geographie* vol. 19. Zürich. 147 p.
- Herzog, T. 1923. Die Pflanzenwelt der bolivianischen Anden und ihres östlichen Vorlandes. Serie *Vegetation der Erde*, Engler, A. & O. Drude (eds.). Edit. W. Engelmann, Leipzig, vol. 15, 258 p.
- Hoffmann, J.A.J. 1992. Das kontinentale Luftdruck- und Niederschlagsregime Südamerikas. *Erdkunde* 46: 40-51.
- Holmgren, C.A., Betancourt J.L., Aasen Rylander K., Roque J., Tovar O., Zeballos H., Linares E. & J. Quade. 2001. Holocene vegetation history from fossil rodent middens near Arequipa, Peru. *Quaternary Research* 56: 242-251.
- Jacobeit, J. 1992. Die großräumige Höhenströmung in der Hauptregenzeit feuchter und trockener Jahre über dem südamerikanischen Altiplano. *Meteorologische Zeitschrift* 1: 276-284.
- Kessler, M. 2003. Biodiversitätsforschung am Beispiel der Pflanzenwelt der bolivianischen Anden.

- Pp. 127-136 En: Gradstein, S.R., R. Willmann & G. Zizka (eds.) Biodiversitätsforschung – Die Entschlüsselung der Artenvielfalt in Raum und Zeit. Kleine Senckenberg Reihe 45, Stuttgart.
- Kistemann, Th. & W. Lauer. 1990. Lokale Windsysteme in der Charazani-Talung. *Erdkunde* 44: 46-59.
- Kreuels, R., Fraedrich K. & E. Ruprecht. 1975. An aerological climatology of South America. *Meteorologische Rundschau* 28: 17-24.
- Lauer, W. 1975. Vom Wesen der Tropen. *Klimaökologische Studien zum Inhalt und zur Abgrenzung eines irdischen Landschaftsgürtels*. Abh. Math.-Nat. Kl./ Akad. Wissensch. u. Lit. 3. Mainz.
- Lauer, W. 1976. Zur hygrischen Höhenstufung tropischer Gebirge. *Biogeographica* 7: 162-182.
- Lenters, J.D. & K.H. Cook. 1997. On the origin of the Bolivian high and related circulation features of the South American climate. *Journal of the Atmospheric Sciences* 54: 656–677.
- Luebert, F. & P. Plissock. 2006. Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. Editorial Universitaria, Santiago. 316 p.
- Miller, A. 1976. The climate of Chile. En: Schwerdtfeger W. (ed.) *Climates of Central and South America*. *World Survey of Climatology* 12: 113-145.
- Monheim, F. 1985. Carl Troll – Tagebücher der Reisen in Bolivien 1926 / 27. *Erdwiss. Forschung* vol. 19. Edit. F. Steiner Verlag, Stuttgart, 390 p.
- Mutke, J. & W. Barthlott. 2005. Patterns of vascular plant diversity at continental to global scales. *Biol. Skr.* 55: 521-531.
- Navarro, G. & M. Maldonado. 2002. Geografía ecológica de Bolivia – Vegetación y ambientes acuáticos. Edit. Centro de Ecología Simón I. Patiño, Cochabamba. 719 p.
- Philippi, R.A. 1860. Die Reise durch die Wüste Atacama auf Befehl der chilenischen Regierung im Sommer 1853-1854. Verlag Anton, Halle. 254 p.
- Rauh, W. 1978. Die Wuchs- und Lebensformen der tropischen Hochgebirgsregionen und der Subantarktis – ein Vergleich. En: Troll C. y Lauer W. (eds.): *Geoökologische Beziehungen zwischen der temperierten Zone der Südhalbkugel und den Tropengebirgen*. *Erdwiss. Forschung* 11: 62-92.
- Richter, M. & A. Moreira-Muñoz. 2005. Heterogeneidad climática y diversidad de la vegetación en el sur de Ecuador: un método de fitoindicación. *Revista Peruana de Biología* 12(2): 217- 238.
- Richter, M. & D. Schmidt. 2002. Cordillera de la Atacama - das trockenste Hochgebirge der Welt. *Petermanns Geographische Mitteilungen* 146: 48-57.
- Richter, M. & W. Lauer. 1987. Pflanzenmorphologische Merkmale der hygrischen Klimavielfalt in der Ost-Kordillere Boliviens. *Aachener Geographische Arbeiten* 19: 71-108.
- Richter, M. 1981. Klimagegensätze in Südperu und ihre Auswirkungen auf die Vegetation. *Erdkunde* 35: 12-30.
- Richter, M. 1996. Klimatologische und pflanzenmorphologische Vertikalgradienten in Hochgebirgen. *Erdkunde* 50: 205-237.
- Richter, M. 2001. *Vegetationszonen der Erde*. Edit. Klett- Perthes, Gotha y Stuttgart. 448 p.
- Richter, M. 2003. Using epiphytes and soil temperatures for eco-climatic interpretations in Southern Ecuador. *Erdkunde* 57: 161-181.
- Schmidt, D. 1999. Das Extremklima der nordchilenischen Hochatacama unter besonderer Berücksichtigung der Höhengradienten. *Dresdener Geographische Beiträge*, Heft 4. 122 p.
- Schmiedecken, W. 1978. Die Bestimmung der Humidität und ihre Abstufung mit Hilfe von Wasserhaushaltsberechnungen – ein Modell (mit Beispielen aus Nigeria). *Coll. Geogr.* 13: 135-159.
- Schwerdtfeger, W. 1961. Strömungs- und Temperaturfelder freien Atmosphäre über den Anden. *Meteorologische Rundschau* 14: 1-6.
- Trewartha, G.T. 1961. *The earth's problem climates*. The University of Wisconsin Press, Madison. 334 p.
- Troll, C. & K.H. Paffen. 1964. Karte der Jahreszeiten-Klimate der Erde. *Erdkunde* 18: 5-28.
- Troll, C. 1959. Die tropischen Gebirge. *Bonner Geogr. Abh.* 25: 1-93.
- Weberbauer, A. 1911. *Pflanzenwelt der peruanischen Anden*. Serie *Vegetation der Erde*, Engler, A. & O. Drude (eds.). Edit. W. Engelmann, Leipzig 12: 1-355.
- Weigend, M. 2004. Additional observations on the biogeography of the Amotape-Huancabamba

- zone in Northern Peru: Defining the South-Eastern limits. *Revista Peruana de Biología* 11(2): 127-134.
- Weigend, M., Cano, A. & E.F. Rodríguez. 2005. New species and new records of the flora in Amotape-Huancabamba Zone: Endemics and biogeographic limits. *Revista Peruana de Biología* 12(2): 249-274.
- Weischet, W. 1996. *Regionale Klimatologie Teil 1: Die Neue Welt*. Teubner Studienbücher, Teubner, Stuttgart. 468 p.
- Young K.R. & C. Reynel. 1997. Huancabamba Region, Peru and Ecuador. Pp. 465-469 En: Davis S.D., Heywood, V.H., Herrera-MacBryde, O., Villa-Lobos, J. & A.C. Hamilton (eds.) *Centres of plant diversity: A guide and strategy for their conservation*, 3: North America, Middle America, South America, Caribbean Islands. IUCN, Gland.