

Jan-Hendrik May

Die zentralen Anden im sich wandelnden Klima

Sonderdruck aus

Freiburger Universitätsblätter

Herausgegeben
im Auftrag des Rektors der Albert-Ludwigs-Universität

Heft 216 – Juni 2017

Die zentralen Anden im sich wandelnden Klima

Kurzfassung

Die zentralen Anden in Südamerika sind nicht nur in geologischer Hinsicht eine sehr dynamische Region – sie liegen auch am Übergang zwischen den feuchten Tropen und trockenen Subtropen und bieten so auf kurzer Distanz eine extrem hohe Diversität an Landschaftszonen. Vor diesem Hintergrund sind die zentralen Anden ein Raum, in dem globale Klima- und Umweltschwankungen im Quartär spürbare Auswirkungen gehabt haben müssen. Die damit einhergehenden Veränderungen in den verschiedenen Landschaften im Raum der zentralen Anden sind deshalb in den letzten Jahrzehnten anhand verschiedenster Landschaftsarchive untersucht worden, um einen besseren Einblick in die Zusammenhänge zwischen Klimawandel und Erdoberflächenprozessen zu bekommen. Dieser Beitrag gibt einen kurzen Überblick über die wesentlichen Probleme und Ergebnisse aus der geomorphologischen und paläoklimatischen Forschung in den zentralen Anden und zeichnet ein Bild der teils markanten Veränderungen der Umweltbedingungen auf unterschiedlichen geologischen Zeitskalen.

1. Einleitung

Der globale Klimawandel ist in den letzten Jahren immer mehr zur Realität geworden, aber seine Auswirkungen sind in den verschiedenen Regionen der Erde extrem variabel. Sie reichen von zunehmenden Dürren hin zu häufigeren Überschwemmungen oder dem rapiden Abtauen von Gletschereis und haben damit einen direkten oder indirekten Einfluß auf unsere Umwelt, der in vielen Fällen von komplizierten Wechselwirkungen geprägt wird. Die Erforschung dieser Zusammenhänge zwischen Klima und allen wichtigen Aspekten der Umwelt ist daher immer mehr zu einem wesentlichen Fokus in unserer Gesellschaft geworden.

Der Beitrag der Geowissenschaften ist dabei vor allem zweierlei. Zum einen wird versucht, den Einfluß des Klimas auf die Erdoberflächenprozesse – z.B. Flußdynamik, Vergletscherungen, die Entstehung von Wüsten etc. – zu verstehen, indem man Beobachtungen und Messungen der Landschaftsdynamik mit Klimaparametern (z.B. Temperatur, Niederschlag, relative Feuchte etc.) vergleicht. Dieser Ansatz ist meist auf die letzten Jahrzehnte beschränkt, weil er auf direkt gemessene Daten angewiesen ist. Die realistisch zu erwartenden Folgen des anthropogenen Klimawandels werden allerdings vor allem langfristig spürbare Auswirkungen auf die globalen klimatischen Rahmenbedingungen und Landschaftsdynamik haben. Um diese abschätzen und verstehen zu können, wird also ebenfalls eine längere zeitliche Perspektive benötigt, die nur durch einen Blick in die jüngere Erdgeschichte gegeben ist.

Neben Änderungen in globaler Temperatur und der Verschiebung von Niederschlagsmustern werden die regionalen Umwelt- und Klimabedingungen über geologische Zeiträume durch die globalen atmosphärischen Zirkulations- und Windsysteme (e.g. Westwinde, Passatzzone, Monsun etc.) geprägt. Vor allem in den Randbereichen dieser Regionen kann eine Verschiebung in Lage und Intensität der Zirkulationsmuster großen Einfluß auf die vorherrschenden Klima- und Umweltbedingungen haben und sollten dort umso deutlicher in der Landschaft abzulesen sein.

Das zentrale Südamerika ist ein solcher Übergangsbereich zwischen den immerfeuchten Tropen des Amazonas-Beckens und den angrenzenden Trockengebieten im subtropischen Chile und Argentinien (Abb. 1a). In Kombination mit tektonisch bedingten Prozessen der aktiven und fortdauernden Gebirgsbildung der Anden ist die Region also ein Raum hoher Geodynamik und war deshalb seit jeher eine Schwerpunktregion für die Paläoumweltforschung auf verschiedenen Zeitskalen von tausenden bis Millionen von Jahren. An vielen Bereichen dieser Forschung war und ist der Autor selbst und damit das Geologische Institut der Universität Freiburg direkt beteiligt. Dieser Artikel versucht daher einen kurzen Überblick über die wesentlichen Forschungsfragen und -ergebnisse hinsichtlich der langfristigen und klimatisch bedingten Landschaftsänderungen in den zentralen Anden und angrenzenden Gebieten zu geben. Das Ziel der Rekonstruktion von Erdoberflächenprozessen und Umweltbedingungen ist deshalb nach Zeitskalen und regional charakteristischen Paläoumwelt- und Landschaftsarchiven (siehe Artikel F. Preusser) gegliedert.

2. Südamerika und die zentralen Anden

Während die Anden in ihrer Gesamterstreckung als längste Gebirgskette der Erde in einem recht engen Streifen entlang einer Nord-Süd-Achse am Westrand des südamerikanischen Kontinents verlaufen, sind die zentralen Anden von einer Biegung und starken Verbreiterung des Gebirgskörpers zwischen etwa 13 und 27° Grad südlicher Breite gekennzeichnet (Abb. 1b). Sie umfassen das weltweit zweitgrößte Hochplateau (»Altiplano-Puna-Plateau«, APP) mit durchschnittlichen Höhen von ca. 4000 m ü. M. Dessen Entstehung geht bis in das Oligozän zurück und ist eng an die Subduktionsgeschichte der Nasca Platte unter die Südamerikanische Platte gekoppelt. Mit Gipfeln von >6000 m. ü. M. ist das Altiplano im Osten von der vulkanisch geprägten Westkordillere begrenzt, während sich im Norden und Osten die Königs- und Ostkordilliere anschließen. Die subandinen Ketten bilden den Übergang zum Amazonas- und Chacobecken im bolivianischen und argentinischen Vorland der Anden.

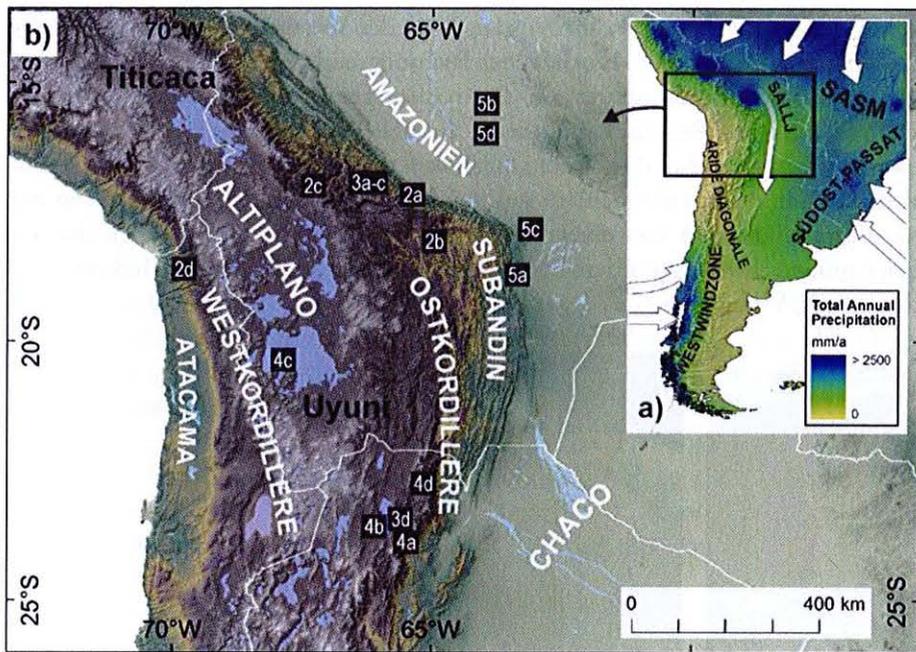


Abb. 1: Geographischer Überblick über die zentralen Anden. a) Lage im südlichen Südamerika mit Relief, Jahresniederschlag und den wichtigsten Elementen der globalen Klimazirkulation (SASM = Südamerikanischer Sommermonsun); b) Topographie und morphotektonische Gliederung der zentralen Anden (Nummern kennzeichnen die Lage aller photographischen Illustrationen). Eigener Entwurf (Topographie basierend auf SRTM250m Daten, Quelle: srtm.csi.cgiar.org; Klimadaten sind CRU Daten, Quelle: <http://www.cru.uea.ac.uk>)

Neben diesen vielfältigen topographischen Eigenschaften sind die zentralen Anden allerdings auch Schauplatz eines stark ausgeprägten Nordost-Südwest verlaufenden Klimagradienten. Unter dem Einfluß des südamerikanischen Monsun erhalten die Nordabhänge der Anden in Bolivien bis 4000 mm Niederschlag pro Jahr. Bis hinauf in Höhen von ~3000 m ü. M ist die Landschaft folglich geprägt von immergrünem Regen- und Nebelwald und starker Abtragung durch eine Vielzahl von Hangrutschungen (Abb. 2a) und steilen Gerinnebetten. Auch wenn diese Spitzenwerte an Niederschlag vor allem in Regionen extremen Reliefs (also starker Höhenunterschiede auf kurzer Distanz) vorkommen, so sind die vorherrschenden sehr feuchten Bedingungen auf die Stauwirkung der zentralen Anden zurückzuführen, die für die tropisch-monsunalen Luftmassen aus Amazonien eine meist unüberwindliche Barriere darstellen.

Im Regenschatten der Nord- und Ostabdachung fällt der Jahresniederschlag schnell auf unter <1000 mm pro Jahr und führt zu semi-ariden Umweltbedingungen in den intra-montanen Tälern (Abb. 2b) sowie dem Altiplano. Diese markante Abnahme an Feuchtigkeit über den zentralen Anden ist trotz ausreichend tiefer Jahresmitteltemperaturen in den Höhenlagen der Anden ein wesentlicher Grund dafür, daß heute nur die höchsten der Gipfel und Bergmassive (Abb. 2c) von Gletschern bedeckt sind. Insgesamt sind die zentralen Anden also Teil einer von sehr trockenen Klimabedingungen gekennzeichneten »ariden Diagonale«, die quer über den Gebirgszug verläuft und

den Einfluß der feuchten Tropen im Norden bzw. der Westwindzone im Süden klar voneinander abgrenzt (Abb. 1a). Noch weiter Richtung Südwesten dacht das Altiplano zur Atacama Küstenwüste ab. Hier – in der trockensten Wüste der Erde – wird der topographisch bedingte Regenschatten noch zusätzlich durch die Tendenz generell absinkender Luftmassen über dem kalten, pazifischen Humbolt-Strom verstärkt. Folglich sinken die mittleren Niederschläge auf wenige mm pro Jahr ab. Weite Teile der Atacama Wüste sind heute von einer völligen Vegetationsabstinenz geprägt, die nur entlang der großen Täler durch den Einfluß von Grundwasser andiner Herkunft unterbrochen wird (Abb. 2d).

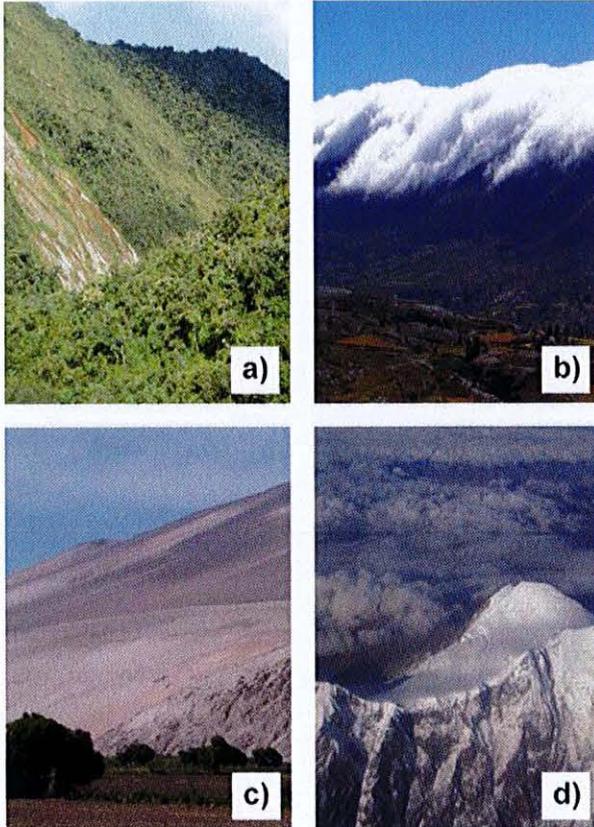


Abb. 2: Beispiele von Landschaftszonen entlang eines Ost-West Transekts über die zentrale Anden. a) Regenwald in der Nordabdachung der Anden in Bolivien (nahe Villa Tunari); man beachte den immerfeuchten Regenwald und noch relativ frische Abrißrische einer Hangrutschung. b) Inner-andines Tal mit sich auflösenden Wolken in der bolivianischen Ostkordillere, die den Feuchtnachschub aus dem Amazonas-Tiefeland hindert. c) Der auch heute noch vergletscherte Berg Illimani (6.421 m ü. NN) bei La Paz in Bolivien als Teil der Königskordillere. d) Landschaft im Lluta-Tal in der Atacama-Wüste Nordchiles; man beachte den starken Kontrast zwischen vegetationslosen Hängen und den immergrünen grundwasser-gespeisten Flußoasen entlang der Haupttäler. Alle Fotos vom Autor.

3. Landschafts- und Klimawandel auf geologischen Zeitskalen

Die zentralen Anden und die »aride Diagonale« sind ein beeindruckendes Beispiel der Wechselwirkung zwischen Tektonik, Topographie und Klima und illustrieren den Einfluß großer Gebirge auf regionale bis kontinentale Klimabedingungen. Über lange Zeiträume von Jahrtausenden ist demnach der zeitlich-räumliche Ablauf der tektonischen Hebung – also der Entstehungsgeschichte der zentralen Anden – von entscheidender Bedeutung für das Verständnis der Klima- und Landschaftsentwicklung. Als eines der jüngsten Gebirge auf der Erde hat die tektonische Entwicklung der Anden

generell in der späten Kreide-Zeit eingesetzt. In den zentralen Anden allerdings beginnt erst ab ca. 50 Mio. Jahren eine Tendenz der tektonischen Einengung, Verfaltung und Hebung, die sich bis heute nach Osten fortpflanzt und ab etwa 15 Mio. Jahren den Raum der subandinen Ketten in Bolivien und Argentinien erfaßt. Da die Erde in diesem Zeitraum einer markanten Abkühlung und Aridisierung ausgesetzt war, wurde schon früh vorgeschlagen, daß dieser globale Klimawandel als möglicher Auslöser und Grund für die Entwicklung der andinen Topographie und die Entstehung des Altiplano in Frage käme. In einem solchen Szenario hätte die globale Klimaentwicklung die Abtragungsprozesse soweit reduziert, daß diese mit der einsetzenden tektonischen Hebung nicht mehr Schritt halten konnten, was letztlich zur starken Hebung und Erhaltung des Altiplano sowie zur Entwicklung der heutigen, orographisch (d.h. vom Gebirge) geprägten Klimasituation im Raum der zentralen Anden führte. In einer alternativen und entgegengesetzten Sichtweise ist die Hebungsdynamik allerdings ausschließlich von tektonischen Vorgängen abhängig. Sie ist damit weitestgehend entkoppelt von globalen Klimaveränderungen und wird deshalb als wesentlicher Steuerungsmechanismus für die Entwicklung der regionalen Klimasituation in und um die zentralen Anden diskutiert.

Während die ostwärtige Erweiterung der Anden und die damit verbundene Entwicklung von geologischer Struktur und Kompression relativ gut verstanden sind, ist immer noch wenig bekannt, wie und wann diese tektonischen Prozesse auch Ausdruck in der Topographie (also Höhenlage) der zentralen Anden gefunden haben – und dementsprechend seit wann die heutige Situation der starken, orographischen Differenzierung des Klimas als Funktion der Topographie existiert. Um die komplexen Wechselwirkungen zwischen Klima und Tektonik entschlüsseln zu können, haben sich die Forschungen zu diesem Thema in den letzten Jahren vor allem auf zwei Schwerpunkte konzentriert. Zum einen wird versucht, durch den Einsatz neuer analytischer Methoden an Gesteinen die Geschichte ihrer Hebung und Exhumation (abtragungsbedingte Freilegung) in den zentralen Anden zu rekonstruieren und so die Gebirgshöhe in der Vergangenheit abzuschätzen (Paläoaltimetrie). Zum anderen können an den im Laufe der Zeit entstandenen Abtragungsprodukten (Sedimenten) mit Hilfe von Isotopenverhältnissen mittlerweile auch Niederschlags- und Temperaturszenarien abgeschätzt werden, welche direkt an die Gebirgshöhe geknüpft sein sollten. Für den Bereich der zentralen Anden wurde so ein besonders schnelles topographisches Wachstum von ca. 1 auf 4 km Höhe zwischen ca. 10-7 Mio. Jahren abgeleitet. Isotopenstudien auf der Ostseite der Anden geben nun ebenfalls Hinweise auf einen Anstieg der regionalen Feuchteverhältnisse um 7.5 Mio. Jahren, der wahrscheinlich als Folge einer intensivierten Hebung des Altiplano gedeutet werden kann. Auf der Westseite der zentralen Anden in der Atacamawüste hingegen scheinen Untersuchungen an vorzeitlichen Böden zu zeigen, daß dort hyperaride Klimabedingungen mit einigen Schwankungen sogar schon seit ca. 12 Mio. Jahren herrschen. Insgesamt deutet somit vieles darauf hin, daß lokale Klima- und Umweltbedingungen über lange Zeiträume sowohl als direkte Folge von orographischen Effekten zu sehen sind, als auch von überregionalen Mechanismen wie globalen Änderungen im Klimasystem oder der Meereszirkulation gesteuert werden. Im Fall der zentralen Anden werden weitere regionale Studien sicher dazu beitragen, die räumlich und zeitlich nicht überall gleich ver-

laufende Klima- und Landschaftsentwicklung zu rekonstruieren und somit die berühmte Frage nach Ursache und Wirkung im Hinblick auf Klimawandel und Gebirgsbildung (also nach dem Huhn und dem Ei) zu klären.

4. Glaziale und interglaziale Zyklen

Seit etwa 2.5 Mio. Jahren – also seit Beginn des letzten Erdzeitalters der Erdgeschichte, dem Quartär (siehe Beitrag F. Preusser) – unterliegt das Erdklima regelmäßigen Schwankungen. Seit ca. 0.8 Mio. Jahren ist jeder dieser Zyklen etwa 100.000 Jahre lang und umfaßt eine lange globale Kaltzeit (oder Eiszeit) sowie eine kurze Warmphase (Zwischeneiszeit). Diese astronomisch gesteuerten Zyklen lassen sich beispielsweise in den Sedimenten der Tiefsee, aber auch in den Eisbohrkernen der Arktis und Antarktis nachweisen. Während die Analyse dieser Klimaarchive Rückschlüsse auf globale Klimaparameter wie Temperatur, Treibhausgase oder die Meereszirkulation erlaubt, sind die regionalen Auswirkungen auf Landschaft und Umwelt in vielen Teilen der Welt bislang noch nicht gut verstanden.

Auch in den zentralen Anden gibt es eine Vielzahl von Hinweisen auf veränderte Klimabedingungen während der globalen Eiszeitzyklen. Vor allem große Moränenkomplexe (Abb. 3a) in heute völlig eisfreien Gebieten zeigen, daß die Gleichgewichtslinie (d.h. die Höhe über welcher im Mittel die Akkumulation von Eis und damit das Wachsen von Gletschern möglich ist) während den Eiszeiten mitunter bis deutlich über 1000 m tiefer gelegen haben muß. Auf Basis kartierter Moränensequenzen lassen sich für die zentralen Anden im Wesentlichen zwei Phasen großer Gletschervorstöße während des letzten glazialen Zyklus rekonstruieren, die vielfach auch in den aufgeschlossenen Gletscherablagerungen als Sedimentpakete unterschiedlicher Farbe und Verwitterungsintensität widerspiegelt werden (Abb. 3b). Oft sind die eiszeitlichen Ablagerungen als Staffeln markanter Seitenmoränen ausgeprägt. Dies deutet auf sehr dynamische Raten der Gletscherbewegung und des Sedimenttransports hin und läßt vermuten, daß ein Großteil des transportierten Materials über Fels- und Eislawinen auf den Gletscher gelangt sein muß.

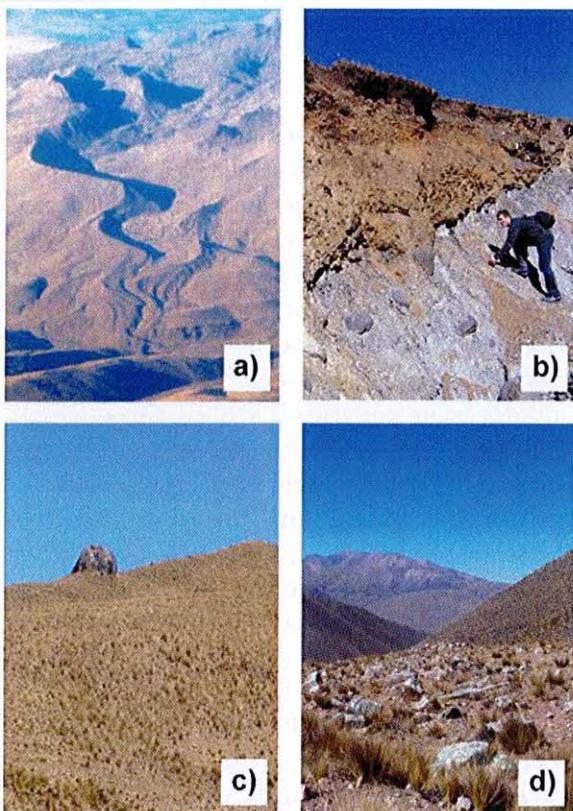


Abb. 3: Typische glaziale und periglaziale Archive in den zentralen Anden als Hinweise für vorzeitliche Vergletscherungen und Temperaturschwankungen. a) Moränenstaffel im Huará Loma Tal nördlich von Cochabamba, Bolivien (Moränen reichen bis etwa 3900 m ü. M herab; b) Zwei Einheiten von glazialen Sedimenten (Tillen) im Tunari-Massiv bei Cochabamba; c) Großer glazial transportierter Geschiebeblock auf einer Lateralmoräne im Huará Loma Tal; d) Periglazialer Hang auf etwa 4200 m ü.M in am Abra de Lipán Paß im Purmamarca Tal in NW Argentinien. Alle Fotos vom Autor.

Bis vor wenigen Jahrzehnten konnten glaziale Ablagerungen ausschließlich über die Radiokohlenstoffmethode von nur in Einzelfällen erhaltenem organischen Material datiert werden. Mittlerweile hat sich allerdings die Oberflächenexpositionsdatierung als nützliches Hilfsmittel etabliert, um Moränen und Gletschervorstöße auch zeitlich in den Griff zu bekommen. Diese Datierungsmethode zielt auf die Messung von kosmogen gebildeter Nuklide ab, die sich in glazial transportierten Blöcken ansammeln (Abb. 3b). Dabei steht der Nuklidgehalt im Gestein direkt mit der Dauer seit Ablagerung der Blöcke in Beziehung. Anhand dieser Methode lassen sich nun für die zentralen Anden im Wesentlichen zwei Phasen großer Gletschervorstöße datieren. In großen Teilen der tropischen Anden scheinen die Gletscher ihre lokalen Maximalstände zwischen ca. 30.000 und 25.000 Jahren erreicht zu haben. Dies ist etwas früher als das globale Temperaturminimum um 20.000 Jahre und deutet auf einen regionalen Niederschlagsanstieg bei gleichzeitiger Abkühlung als Auslöser für das Gletscherwachstum hin. Die Höhenlage der Moränen reduziert sich in den zentralen Anden systematisch entlang des heutigen Feuchtegradienten nach Nordosten in Richtung des Amazonas-Tieflandes. Auch in der Eiszeit muß also der wesentliche Teil des Niederschlags aus dem tropischen Norden in die zentralen Anden gekommen sein. Ein zweiter großer Vorstoß folgte dann zwischen ca. 17.000 und 12.000 Jahren.

Bei der quantitativen Beurteilung der paläoklimatischen Bedingungen zur Zeit der Moränenbildung – also während eines Gletscherhochstandes – hilft hier zusätzlich die Klima-Gletscher-Modellierung. Auf deren Basis werden die jüngeren Gletschervorstöße mit mäßig kalten, aber sehr feuchten Klimaverhältnissen in Zusammenhang gebracht, während die vorangegangenen, älteren Vorstöße mit einer teils erheblich tiefer liegenden Gleichgewichtslinie und einer massiven Temperaturreduktion von -5 bis -8°C im Zusammenhang der globalen Abkühlung ohne wesentliche Änderungen des jährlichen Niederschlags erklärt werden. Insgesamt kann also geschlußfolgert werden, daß die Vereisungsgeschichte aufgrund des heute wie damals starken Niederschlagsgradienten in den zentralen Anden und der daraus resultierenden spezifischen Empfindlichkeit von Gletschern auf vergangene Temperatur- und Niederschlagsänderungen regional variiert. Im Gegensatz zur weit verbreiteten Annahme, daß Gletscher vor allem als Anzeiger für besonders kalte Klimaphasen gelten, sind es in den zentralen Anden wohl mindestens in gleichem Maße Feuchteschwankungen im Zusammenhang mit einer Intensivierung der monsunalen Zirkulation, die das Wachstum bedingt haben.

Trotz einer allgemeinen Absenkung der Gleichgewichtslinie konnten sich in den zentralen Anden auch während besonders feuchter oder kalter Phasen nicht überall Gletscher bilden. Dies gilt vor allem für Bereiche mit ausgeprägter Trockenheit unterhalb der nivalen Stufe oder Schneegrenze, der »tierra helada« (deutsch: gefrorenes Land). In dieser Höhenstufe dominieren auch heute noch periglaziale Prozesse, die vom starken Frostwechsel und dem Vorhandensein von zumindest partiellem Permafrost bestimmt werden. Solche Prozesse führen zum einen zu einer sehr intensiven Frostsprengung, d.h. zur mechanischen Zerkleinerung von Gestein, und zum anderen zum hangabwärts gerichteten Transport des resultierenden Frostschutts (Abb. 3d). Für die Landschaft hat das im Wesentlichen zwei Auswirkungen. Da diese auch heute oberhalb von ca. 4000 m ü. M noch sehr aktiven Prozesse im Gegensatz zur Gletscher- und Flußerosion flächenhaft wirken, ist das Relief in weiten Teilen dieser Höhenstufe von weichen, konvexen Hängen geprägt (Abb. 3d, 4a). Außerdem muß die räumliche Wirksamkeit der Frostsprengung und des Hangabtrages vor allem in Phasen globaler Temperaturreduktion während der Eiszeiten stark zugenommen haben, da große Hangbereiche von periglazialen Prozessen erfaßt wurden. Das hätte einen starken Anstieg in der Sedimentproduktion an den Hängen zur Folge und wird somit auch als ein möglicher Faktor bei der Entwicklung der Flüsse und Talsysteme diskutiert.

Viele der großen Täler und Becken in den trockeneren Bereichen der zentralen Anden sind heute von mächtigen Terrassensystemen charakterisiert (Abb. 4a). Diese meist grobkörnigen Schotterterrassen sind das Resultat von einer starken und wahrscheinlich lang andauernden Akkumulationstendenz der Flüsse, welche vielerorts die Täler bis mehrere hundert Meter Mächtigkeit mit Sediment verfüllt haben muß. Für die Datierung solcher Flußablagerungen steht erst seit ca. 20 Jahren die Lumineszenz-Datierung (siehe Beitrag F. Preusser) zur Verfügung, mit deren Hilfe man den Ablagerungszeitpunkt von Sediment bestimmen kann. Basierend auf den ersten Ergebnissen aus den zentralen Anden scheinen die Phasen von Terrassenakkumulation zwar ganz allgemein in die Eiszeit zu fallen, sind aber andererseits wohl nicht überall zeitgleich. Ähnlich wie bei den Gletschervorstößen ist dies wohl unter anderem die Folge der un-

terschiedlichen Sensitivität gegenüber Änderungen im Verhältnis von Erosionskraft (Abfluß) und Sedimentaufkommen.

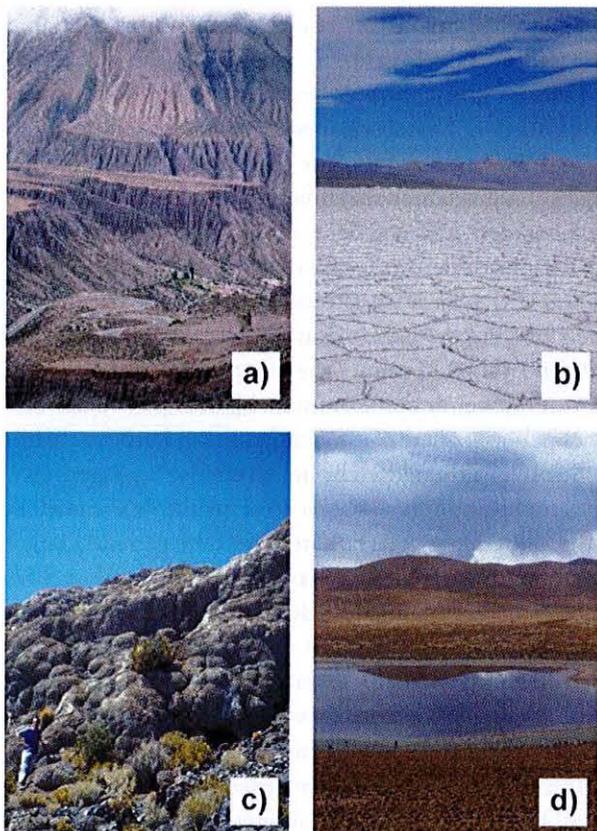


Abb. 4: Beispiele vorzeitlicher und heutiger Tal- und Seelandschaften in den zentralen Anden, die Hinweise geben auf starke, klimatisch bedingte Feuchteschwankungen. a) Terrassenkörper aus Grobschottern in der Quebrada de Purmamarca, NW Argentinien (man beachte die auf das Terrassenniveau ausgerichteten und eingeschnittenen Schwemmfächer am Hang im Hintergrund); b) Salinas Grandes Salzpfanne in der argentinischen Puna (man beachte das polygonale Salzmuster); c) Massive, karbonathaltige Stromatolithenbildung nahe der ehemaligen Strandlinie des »Tauca-Sees« bei Uyuni, Bolivien; d) Laguna de Aparzo in der argentinischen Ost-Kordillere. Alle Fotos vom Autor.

Noch weniger Daten gibt es bislang zum Beginn der Einschneidung, welche dafür verantwortlich ist, daß ehemals verfüllte Talböden nun als Terrassen hoch über dem Talgrund zu finden sind. Daß diese Einschneidung nicht unmittelbar nach Ende der Akkumulationsphase begonnen haben kann, zeigt eine Reihe von geomorphologischen Befunden auf den Terrassenoberflächen. Diese Befunde umfassen z.B. Seeablagerungen, Schwemmfächer, gekappte Bodenhorizonte und vom Wind transportierte Sedimente wie Sand oder Löß. Während also eine im Zuge der eiszeitlichen Temperaturreduktion um mehr als 1000 m tiefer gelegene periglaziale Höhenstufe als eine mögliche Erklärung für die Verfüllung der großen Täler gelten kann, wird für die Einschneidung und Ausräumung der groben fluvialen Sedimente eine Verstärkung der Erosionskraft benötigt, welche in den zentralen Anden wohl eher an monsunale gesteuerte Feuchtephasen geknüpft ist.

5. Feuchteschwankungen auf orbitalen Zeitskalen

Feuchteschwankungen spiegeln sich im Allgemeinen in Änderungen des Wasserhaushalts von Seen wider und lassen sich durch die Analyse von Seeablagerungen rekon-

struieren. Dies gilt vor allem für endorheische (also abflußlose) Seebecken, welche besonders sensitiv auf veränderte Niederschlags- und Temperaturbedingungen reagieren. Im gesamten Altiplano-Puna-Plateau gibt es eine Vielzahl von endorheischen Becken, die je nach Größe und Lokalklima ein weites Spektrum von Süßwasser- bis zu Salzseen (Abb. 4b) abdecken.

Der Titicaca-See im nördlichen APP ist der größte Süßwassersee in Südamerika (Abb. 1b). Für die letzten >150.000 Jahre wurden klimatisch bedingte Schwankungen in Wassertiefe, aber auch Seeökologie und Sedimentzufuhr aus der Analyse von Seekernen abgeleitet. Heute liegt der Seespiegel nahe seiner maximalen Höhe, und in besonders feuchten Jahren fließt der See über den Desaguadero Fluß nach Süden in eine Kaskade von großen Seebecken über. Einer dieser Seen im südlichen Altiplano Boliviens ist der Uyuni See, der größte Salzsee der Erde. Während diese riesige Salzfläche heute auch in den feuchtesten Jahren nur von wenigen Zentimetern Wasser bedeckt ist, lassen sich für die letzten >100.000 Jahre extreme Seespiegelschwankungen an ehemaligen Küstenlinien ablesen. Diese Küstenlinien kommen bis >100 m über der heutigen Salzpflanze vor und sind vielfach assoziiert mit mächtigen und karbonathaltigen Ablagerungen von Algen und Stromatolithen, welche in Ufernähe und geringer Wassertiefe während der Seespiegel-Hochstände gewachsen sind (Abb. 4c). Zum einen erlauben diese lakustrinen (im See gebildeten) Karbonate eine sehr genaue Datierung mittels geochemischen Methoden, zum anderen dienen sie über die Analyse von diversen Isotopen auch als Informationsquelle, um die Wasserherkunft und damit deren klimatische Relevanz abzuleiten.

Mit diesen Methoden hat sich in den letzten Jahren für Uyuni, aber auch für andere, kleinere Seen im APP ein Bild von markanten Wechseln zwischen Feucht- und Trockenperioden rekonstruieren lassen. Wassertiefen von wenigen Metern bis einigen Zehnermetern wurden mindestens sechsmal während des letzten glazialen Zyklus erreicht. Sie scheinen vorwiegend mit besonders kalten Bedingungen im nordhemisphärischen Atlantik in Zusammenhang zu stehen und sind ein weiteres Beispiel für die komplexen und großräumigen Verknüpfungen, die das globale Klimasystem kennzeichnen. Die größten Seetiefen und -volumen wurden dann gegen Ende der letzten globalen glazialen Periode zwischen etwa 14.000 und 18.000 Jahren vor heute erreicht. Die dominant nördliche Herkunft des Wassers dieses über 120 m tiefen und >30.000 km² großen »Tauca-Sees« deutet dabei auf eine starke Feuchtezufuhr aus dem Amazonas-Becken während einer besonders intensiven Phase des südamerikanischen Monsunsystems hin. Außerdem werden solche extremen Feuchtephasen wohl durch eine generell weit im Süden gelegene ITCZ unterstützt, welche wiederum stark von astronomischen Parametern abhängt.

Unter Berücksichtigung neuerer Forschung erstreckte sich der Einfluß dieser sogenannten »Tauca-Feuchtphase« sogar bis in die heute hyperaride Atacama Wüste in Nordchile und zeigt, daß auch dort die Landschaftsentwicklung nur vor dem Hintergrund von Klimawandel verstanden werden kann. Während die großen, endorheischen Seebecken auf die zentralen und heute trockeneren Teile des APP beschränkt sind, gibt es auch in der Ostkordillere zahlreiche kleinere, abflußlose Seen (Abb. 4d), welche bislang noch nicht im Detail untersucht worden sind und ein großes Potential für zukünftige Arbeiten darstellen.

Neben den großen Flüssen wie dem Rio Pilcomayo, Rio Grande, Rio Mamoré und Rio Beni, die einen weiten Teil der östlichen zentralen Anden drainieren, tragen am Andenfuß (Piedmont) auch eine Reihe mittlerer und kleiner Einzugsgebiete zur Erosion der subandinen Ketten bei. Die Ablagerungen dieser Piedmont-Flüsse sind oft entlang von eingetieften Canyons oder in Flußterrassen aufgeschlossen (Abb. 5a) und erlauben eine sehr genaue Rekonstruktion von sich abwechselnden aktiven und stabilen morphologischen Phasen. Im heute von dichtem Wald bedeckten Tiefland werden dabei die Phasen aktiver Sedimentation tendenziell mit einer Auflockerung der Vegetationsdecke und allgemein trockeneren Bedingungen in Verbindung gebracht. Im Gegensatz dazu sind die stabileren Phasen eher von flächendeckender Bodenbildung unter Wald und feuchten Umweltbedingungen ähnlich den heutigen charakterisiert. Entlang des östlichen Andenfußes in Bolivien fällt dabei eine starke Reduktion im Sedimentkaliber von groben, eiszeitlichen Schottern hin zu Sanden und Schluffen in den nacheiszeitlichen letzten 12.000 Jahren (d.h. im Holozän) auf. Dies wird generell als Resultat von gesteigerten eiszeitlichen Erosionsraten und aufgelichteter Vegetationsdecke unter trockeneren Verhältnissen gewertet, zeigt aber wohl auch die erhöhte Transportkraft stärkerer Niederschlags- und Abflußereignisse zu dieser Zeit.

Außerhalb der zentralen Anden gibt es bislang noch wenige Untersuchungen zur Entwicklung von Erdoberflächenprozessen über längere Zeitskalen. Ähnlich wie im APP sollten auch hier starke Feuchteschwankungen auf Zeitskalen von Tausenden von Jahren stattgefunden haben. In der Tat lassen sich im Andenvorland eine Vielzahl von inaktiven Flußläufen (Paläoflüsse; Abb. 5b) identifizieren und trotz der schwierigen Erreichbarkeit sehr genau vermessen. Dies gilt vor allem für das Amazonas Tiefland in Nordbolivien. Hier hat man über die räumliche Beziehung dieser Paläoflüsse und geomorphologische Vergleiche mindestens sechs aufeinanderfolgende Generationen von Flüssen ausgegliedert, die allesamt unterschiedliche Eigenschaften im Hinblick auf Abfluß und Sedimentfracht gehabt haben müssen. In Analogie zur »Tauca-Feuchtphase« im APP hat man inzwischen durch Analyse von immer neuen und höher aufgelösten Satellitenbildern und Datierung von Sedimentproben gute Hinweise auf einen starken Anstieg der Abflußmengen zwischen ca. 20.000 und 12.000 Jahren vor heute mit stark vergrößerten Flußbreiten und Mäanderwellenlängen. Bei der vergleichenden hydrologischen Interpretation der verschieden alten Paläoflußläufe ist allerdings Vorsicht geboten, da neben dem Klima auch Flußumlagerungen zu Modifikationen des Einzugsgebiets und damit zu Änderungen von Abfluß und Sedimentfracht führen können.

6. *Holozäne Landschaft*

Im Vergleich zur eiszeitlichen Landschaft wurde die Erdoberflächendynamik im Holozän lange als »relativ stabil« angenommen. Während dies für manche Teile der Erde, z.B. in Mitteleuropa, auch eingeschränkt gelten mag, sind die letzten 12.000 Jahre in und um die zentralen Anden von großen Veränderungen in der Landschaft geprägt, die vor allem mit signifikanten Niederschlagsschwankungen mit über Jahrhunderte bis Jahrtausende anhaltende Dürreperioden in Verbindung gebracht werden. Ein Zusammenhang mit Meerestemperaturen und der Auftretenshäufigkeit vom El Niño/La

Niña Klimaphänomen wird diskutiert, aber bislang fehlen für große Teile des südamerikanischen Kontinents detaillierte und zeitlich gut genug aufgelöste Landschaftsarchive, um diese Vermutung zu testen.

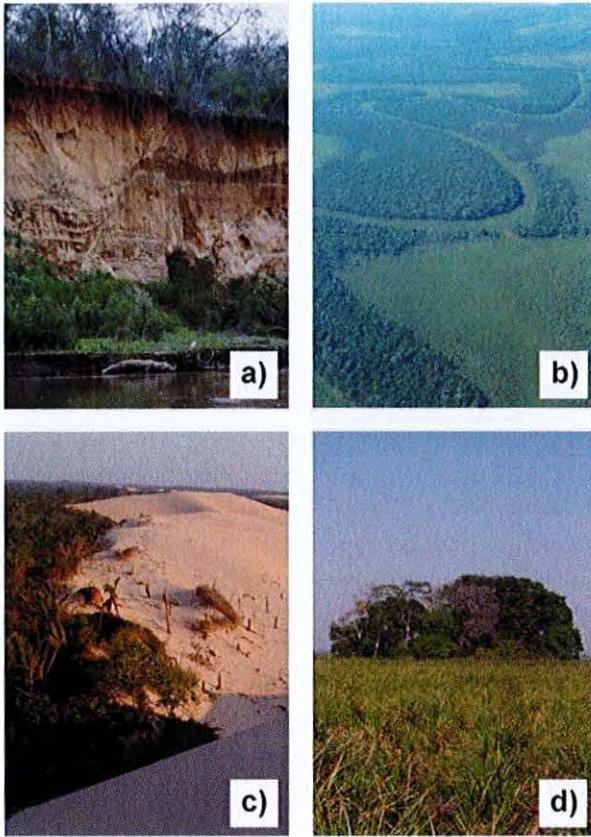


Abb. 5: Landschaften im Andenvorland und deren Bedeutung für die Rekonstruktion von Umweltschwankungen. a) Aufschluß bei Cabezas im bolivianischen Chaco, der Einblick in die fluviale Entwicklung der Piedmont Flüsse gibt; b) Mäandrierender Paläofluß in den Llanos de Moxos im bolivianischen Amazonas-Becken (man beachte das vom Galeriewald nachgezeichnete ehemaliges Dammufer; c) Aktive Dünenfront in den »Lomas de Arena« bei Santa Cruz; die Dünen wandern mit ca 15-20 m pro Jahr und begraben so den umgebenden tropischen Wald. d) Früh- bis mittelholozäne, anthropogene Waldinsel in der Überschwemmungssavanne der Llanos de Moxos. Alle Fotos vom Autor.

Eine Ausnahme stellen Sedimentkerne aus dem Titicacasee dar, die einen bis zu 100 m tieferen Seespiegel zwischen ca. 6.000 und 4.000 Jahren vor heute anzeigen und wesentlich trockenere Bedingungen im Mittelholozän vermuten lassen. Im Gegensatz dazu gibt die größerflächige Analyse von Pollen keine eindeutigen Hinweise auf wesentliche Änderungen in den meisten vorherrschenden Biomen (Großlebensräume), was im Sinne einer überraschend hohen Anpassungsfähigkeit der Vegetation an sich ändernde klimatische Bedingungen im Raum der zentralen Anden bewertet wird. Markante Auswirkungen auf die Vegetation konzentrierten sich während dieser Zeit eher auf die Ökotope (also randliche Biome), was z.B. zur Umwandlung von Nebelwäldern in Savanne und halbhimmergrünen Wald an der Anden-Nordabdachung führte. Entlang des subandinen Piedmonts im ostbolivianischen Tiefland am Rande des Gran Chaco zeigen stratigraphische Arbeiten einen extremen Anstieg in Sedimentationsraten und fluvialer Dynamik einhergehend mit Flußverlagerungen und der Bildung von Schwemmfächern zwischen ca. 8.000 und 5.000 Jahren vor heute. Die Entstehung von weitverbreiteten, aber heute von Wald bedeckten Dünen und Dünenfeldern werden im allgemeinen mit einer aktiven Landschafts- und Sedimentdynamik unter

dem Einfluß einer starken Saisonalität im Mittelholozän in Zusammenhang gebracht. Allerdings gibt es bislang kaum Informationen, die diese Vermutung unterstützen. Die wenigen Altersdatierungen an diesen Dünen deuten eher auf mehrere Phasen von Dünenbildung und -wanderung innerhalb der letzten ca. 3.000 Jahre hin. Die auch heute noch aktiven Dünensysteme der »Lomas de Arena« in Ostbolivien (Abb. 5c) legen für die paläoklimatische Interpretation der Dünen nahe, daß nicht etwa lange andauernde Trockenphasen, sondern ein steter Sedimentnachschub unter variablen Klimabedingungen in Kombination mit dem lokal intensiv ausgeprägten Windsystem des »low-level jet« (SALLJ) in Ostbolivien (vgl. Abb. 1a) die Entstehung und Wanderung der Dünensysteme ermöglicht haben.

Wie in vielen Teilen der Erde ist die Landschaft in den zentralen Anden in der jüngsten Erdgeschichte auch stark vom Menschen beeinflusst worden. Neben der intensiven Rodung der großen Waldbestände für landwirtschaftliche Zwecke gibt es in und um die zentralen Anden eine Fülle von archäologischen Beispielen für komplexe Mensch-Umwelt-Beziehungen während der vorspanischen Zeit. Dabei sind vor allem die großen Hochkulturen der Inka in den Gebirgsregionen zu nennen. In den letzten Jahren sind aber auch im Andenvorland eine Vielzahl von menschlichen Eingriffen in die Landschaft dokumentiert worden. Insbesondere hunderte von anthropogenen Waldinseln (Abb. 5d) dokumentieren eine tausende Jahre andauernde und extensive Nutzung der Überschwemmungs-Savannen durch Jäger und Sammler, die bis >10.000 Jahre in die Vergangenheit reicht. Entgegen des landläufigen Glaubens, daß die Umweltbedingungen in vielen Teilen des Amazonas-Tieflandes die Entwicklung von höhergestellten Gesellschaften limitiert hätten, zeigt sich gerade in diesem Raum eine intensive Nutzung der Ressourcen während der letzten 1.500 bis 2.000 Jahre, die nur auf Basis einer tiefgründigen Kenntnis der Naturlandschaft erklärbar ist und somit bei der Rekonstruktion von natürlicher Landschafts- und Klimadynamik berücksichtigt werden muß.

7. Kurze Schlussfolgerungen

In der Gesamtschau der paläoklimatischen und geomorphologischen Arbeiten im Raum der zentralen Anden ergibt sich ein Bild von starken Änderungen der Umwelt und Erdoberflächenprozesse. Dabei ist Klima auf allen Zeitskalen von Jahren bis Jahrtausenden sicher ein wesentlicher Parameter, auch wenn die Steuerung des Klimas auf die Landschaft nicht in jedem Einzelfall von anderen Einflußgrößen wie Tektonik und menschlichen Eingriffen getrennt werden kann. Sowohl Temperatur- als auch Niederschlagsschwankungen spielen eine große Rolle für viele geomorphologische Prozesse, scheinen aber die Landschaftsentwicklung oft eher indirekt und über komplexe Wechselwirkungen, z.B. mit der Vegetation, zu steuern. Deshalb besitzen die diversen Indikatoren für Landschaftsdynamik unterschiedliche Aussagekraft, was wiederum deren direkte Vergleichbarkeit erschwert und für die paläoklimatische Interpretation Vorsicht gebietet. In Kombination mit der bislang räumlich noch sehr geringen Dichte an Daten und Ergebnissen eröffnet dieser Umstand schließlich auch eine Reihe von vielversprechenden Möglichkeiten für den Ausbau des existierenden geowissenschaftlichen Engagements der Universität Freiburg in den zentralen Anden.

Weiterführende Literatur

- Ekdahl, E. J., Fritz, S. C., Baker, P. A., Rigsby C. A. and Coley K. 2008. Holocene multidecadal- to millennial-scale hydrologic variability on the South American Altiplano. *The Holocene*, 18: 867-876
- May J.-H., Zech R., Schellenberger A., Kull C. and Veit H. 2011. Quaternary and environmental climate changes in the Central Andes, edited by Salfity J.A. and Marquillas R.A. *Cenozoic geology of the Central Andes of Argentina*: 247-263.
- May J.-H. 2013. Dunes and dunefields in the Bolivian Chaco as potential records of environmental change. *Aeolian Research* 10: 89-102.
- Mayle F. E. and Power M. J. 2008. Impact of a drier Early-Mid-Holocene climate upon Amazonian forests. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences* 363 (1498): 1829-1838.
- Lombardo U., Szabo K., Capriles J. M., May J.-H., Amelung W., Hutterer R., Lehndorff E., Plotzki A., and Veit H. 2013. Early and middle Holocene hunter-gatherer occupations in western Amazonia: the hidden shell middens. *PLoS one* 8 (8): e72746-e72746.
- Placzek C. J., Quade J., and Patchett P. J. 2013. A 130ka reconstruction of rainfall on the Bolivian Altiplano. *Earth and Planetary Science Letters* 363: 97-108.
- Plotzki A., May J.-H., Preusser F., Roesti B., Denier S., Lombardo U., and Veit H. 2015. Geomorphology and evolution of the late Pleistocene to Holocene fluvial system in the south-eastern Llanos de Moxos, Bolivian Amazon. *Catena* 127: 102-115.
- Strecker M. R., Alonso R. N., Bookhagen B., Carrapa B., Hilley G. E., Sobel E. R., and Trauth M. H. 2007. Tectonics and Climate of the Southern Central Andes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 35 (1): 747-787.
- Zech R., May J.-H., Kull C., Ilgner J., Kubik P. W., and Veit H. 2008. Timing of the late Quaternary glaciation in the Andes from 15 to 40° S. *Journal of Quaternary Science* 23 (6-7): 635-643.