

DENIS FABRE - BERNARD FRANCOU - BRIGITTE KAISER -
CLAUDIO SMIRAGLIA - FRANÇOIS VALLA

UN *ROCK GLACIER* ATIPICO
NELL'AMBIENTE TROPICALE ARIDO DEL SUD LIPEZ
(VULCANO CAQUELLA, BOLIVIA)
MORFOLOGIA E STRUTTURA (*)

Introduzione. – L'interesse per lo studio della criosfera in ambiente tropicale si è notevolmente ampliato in questi ultimi anni, da quando i risultati dei primi carotaggi sui ghiacciai delle Ande Peruviane hanno evidenziato che le variazioni termiche tardiglaciali e oloceniche hanno avuto un'ampiezza, a differenza di quanto ritenuto precedentemente, comparabile con quella delle medie ed alte latitudini (Thompson e altri, 1995; Kaser, 1995). La possibilità di individuare nel ghiaccio andino tropicale la successione degli eventi ENSO (*El Niño Southern Oscillation*) e le relazioni messe in evidenza fra i bilanci di alcuni apparati glaciali peruviani e boliviani e gli stessi eventi (Francou e altri, 1995) hanno ulteriormente stimolato lo sviluppo di programmi internazionali di ricerca (Thompson e altri, 1999). Le reti di osservazione si sono quindi ampliate e i ghiacciai-test sono divenuti più numerosi, in particolare sui ghiacciai delle Ande tropicali (Pouyaud, Francou e Ribstein, 1995; Kaser, 1995; Wagnon e altri, 1998; Kaser, in corso di stampa). Meno spazio è stato tuttavia dato alle forme periglaciali che in alcune aree, in particolar modo nella fascia tropicale andina in senso stretto (attorno ai 20° S), rappresentano i soli fenomeni criosferici oggi ancora attivi.

La presente nota intende illustrare alcuni aspetti dell'ambiente periglaciale arido del Sud Lipez (Bolivia meridionale) e in particolare segnalare la presenza

(*) Le osservazioni da cui prende avvio il presente lavoro sono state compiute nel luglio 1997 durante l'escursione in Bolivia organizzata dall'International Glaciological Society (Section Alpes Occidentales). La partecipazione di C. Smiraglia si è giovata di un contributo del Comitato Glaciologico Italiano. L'articolo qui presentato deriva da un lavoro comune dei vari autori e da comuni osservazioni sul terreno; C. Smiraglia ha redatto il testo con la collaborazione di B. Kaiser, D. Fabre ha curato la parte dei sondaggi geoelettrici su un sito già individuato da B. Francou e sul quale quest'ultimo autore aveva effettuato rilievi nel quadro del suo programma *Neige et glaciers tropicaux*.

di un *rock glacier* atipico in quell'ambiente per le notevoli dimensioni e per la complessa struttura, probabilmente il più importante nella fascia intertropicale.

L'ambiente del Sud Lipez. – Il Sud Lipez, situato nella Bolivia sud-occidentale poco a nord del Tropico del Capricorno (20-21° S), rappresenta uno dei più classici «deserti d'altitudine» del globo. La regione, che confina con il deserto cileno di Atacama, è caratterizzata da numerosi *salares* e da imponenti con vulcanici che si alzano fra 5.000 e 5.900 m. Gli apparati vulcanici, originati da eruzioni subrecenti (verso ovest al confine con il Cile alcuni vulcani, come l'Olague, 5.865 m, sono ancora attivi), emergono da piattaforme ignimbriche del Miocene superiore e del Pliocene.

Ciò che maggiormente colpisce per un ambiente di alta montagna che sfiora i 6.000 m è la totale mancanza di ghiacciai (Graf, 1986; Francou, 1993). Numerose sono invece le tracce di glaciazioni antiche, creste moreniche in particolare, ancora ben affilate, costituite da materiale sciolto dove si mescolano clasti andesitici e dacitici. I cordoni morenici sono osservabili sui versanti di tutti i vulcani che superano i 5.500 m di altezza e permettono di individuare lingue glaciali che in due o tre fasi sono scese fino ai piedi dei vulcani stessi raggiungendo la quota minima di circa 4.500 m.

La mancanza di apparati glaciali attuali è da imputare all'esiguità delle precipitazioni, che rende queste montagne notevolmente aride e che porta la linea teorica di equilibrio dei ghiacciai (qui le superfici di altitudine superiore a 5.800 m sono ridotte) a circa 6.000 m, al di sopra, cioè, delle cime più elevate. La stazione meteorologica della Laguna Colorada (22°13' S, 4.280 m) ha fatto registrare su cinque anni una media di 66 mm d'acqua; le temperature medie mensili toccano gli 0° da giugno ad agosto, con minime giornaliere al di sotto di -20°C, mentre salgono fra i 5° e gli 8°C da dicembre a marzo (Graf, 1986). Sulle sommità le precipitazioni annuali sono stimate in circa 250-300 mm (Vuille e Amman, 1997) e sono esclusivamente solide al di sopra dei 5.000 m. La neve sparisce metà per sublimazione e metà per fusione, producendo un'infiltrazione nel suolo di quasi 100 mm annui. Poiché l'isoterma di 0°C si colloca attorno ai 4.800 m, in tutta la fascia che ha questa isoterma come limite inferiore e l'ELA (Equilibrium Line Altitude) come limite superiore si ha gelo notturno quotidiano e si verificano quindi condizioni favorevoli alla formazione di *permafrost*; la scarsa umidità riduce tuttavia le possibilità criogeniche di questo ambiente. In effetti nel Sud Lipez le forme periglaciali sono poco diffuse dal punto di vista quantitativo e piuttosto limitate quanto a tipologia. Sui numerosi vulcani distribuiti fra i 21°18' S e i 22°47' S sono state osservate colate di pietre fra 4.600 e 5.350 m, suoli strutturati fra 4.600 e 5.600 m e suoli striati fra 4.800 e 5.900 m (Graf, 1986), il cui limite inferiore di attività viene ritenuto intorno ai 5.500 m (Francou, 1993). Fino alle osservazioni della Spedizione IGS (Fabre e altri, 1998; Francou e altri, 1999; Fabre e altri, 2001) non vi erano state segnalazioni di *rock glaciers* in questa regione. Solo in Clapperton e altri (1997) vi è un breve cenno sulla presenza di *rock glaciers* sui settori più elevati (fra 4.200 e 4.500 m) dei vulcani Cerro Azanaques e Cerro Tunupa, siti più a nord del Caquella, senza tuttavia che vengano fornite ulteriori indicazioni.

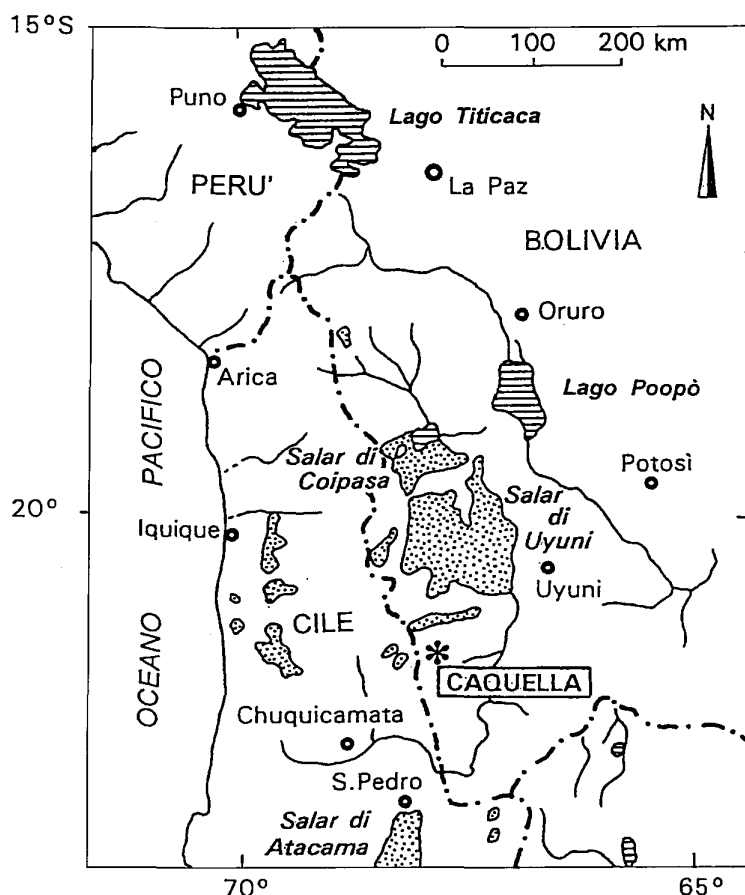


Fig. 1 - Carta d'insieme della zona del Vulcano Caquella e del Sud Lipez (Bolivia)

Il rock glacier del Vulcano Caquella. - Il Vulcano Caquella (5.960 m) si trova nel settore settentrionale del Sud Lipez a 21°30' S e 68°15' O e domina la Laguna Canapa (fig. 1).

Il Caquella è un classico strato-vulcano che raggiunge una quota di 5.960 m, formato dall'alternanza di colate andesitiche e depositi piroclastici, il cui cono regolare è frammentato e sbrecciato nella sua parte apicale da profondi valloni, in particolare sul versante occidentale e sul versante sud-est; sul fondo e sui fianchi dei valloni si raccolgono placche e lingue di neve gelata che nel luglio 1997 scendevano fino a 4.500 m circa. Su tutti i versanti del vulcano sono evidenti cordoni morenici che disegnano numerose lingue radiali. Particolarmente ricco di evidenze glaciali e periglaciali si presenta il versante sud-est, dove il cratere è stato in gran parte smantellato da fenomeni esplosivi che hanno dato origine a uno pseudocirco, rimodellato comunque dal glacialismo. Dalla base del cono vulcanico fino a circa 4.800 m si distinguono nettamente tre serie di cordoni morenici che disegnano una lingua glaciale articolata in due lobi principali di lunghezza via via più ridotta.

Poco più a monte della terza serie di cordoni morenici, a partire da circa

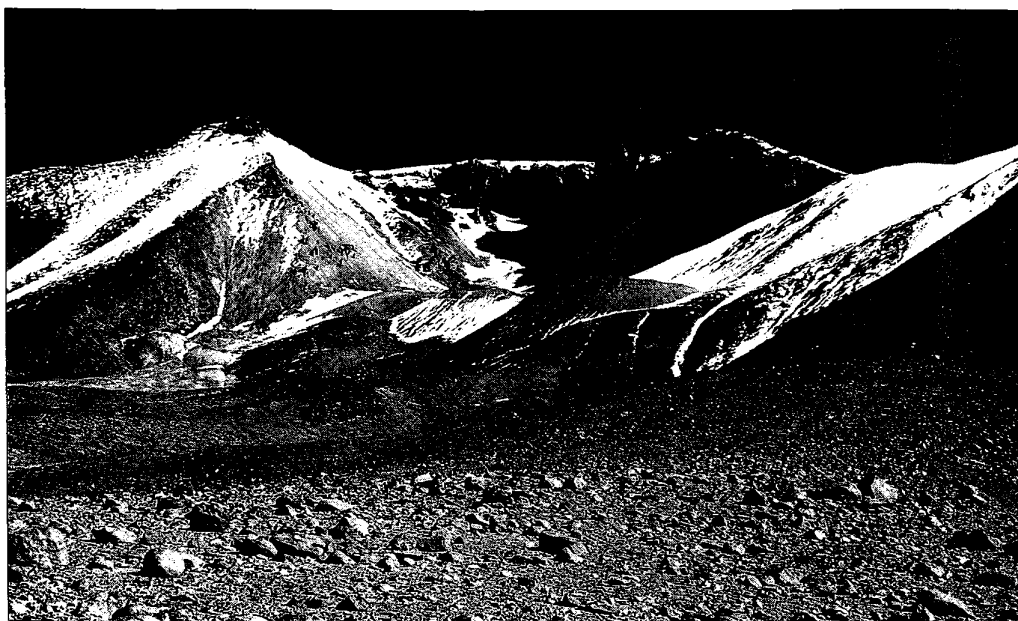


Fig. 2 – Il rock glacier del Vulcano Caquella (foto C. Smiraglia, 18 luglio 1997)

Si osservi lo pseudocirco derivante dallo smantellamento del cratere che ospita placche di nevato e il rock glacier descritto nell'articolo, di cui è ben visibile la fronte nel centro dell'immagine

5.300 m, si estende un grande *rock glacier*, le cui dimensioni e la cui complessità morfologica lo rendono eccezionale e atipico nell'ambito delle regioni tropicali, che è uno dei pochi segnalati e studiati in queste aree (fig. 2).

Si tratta infatti di una colata detritica che si allunga per 1.200 m da 5.300 a 5.600 m con una larghezza media di 180 m e una superficie di circa 0,23 km², che costituisce probabilmente il più importante *rock glacier* nella fascia intertropicale. Apparentemente semplice nella sua geometria generale, nel dettaglio presenta una notevole complessità e può essere suddiviso longitudinalmente in tre settori dalle morfologie diversificate (fig. 3).

La parte frontale è costituita da un grande lobo con un versante verso valle alto 80-100 m, formato da un ripido pendio di detriti instabili. Il settore inferiore del *rock glacier* è caratterizzato da almeno tre gradini che delimitano verso monte altrettante zone lievemente concave, dove si distinguono numerose rughe arcuate verso valle. Il terzo gradino è contraddistinto da un notevole dislivello che sembra quasi separare il settore medio-superiore del *rock glacier* da quello inferiore. Le rughe frontali sono spesso la continuazione di cordoni longitudinali ben evidenti, alti anche una quindicina di metri, che percorrono buona parte della superficie del *rock glacier* e che sono almeno in parte correlabili alle fasce detritiche provenienti dalla parete settentrionale.

Il settore intermedio del *rock glacier* è caratterizzato verso valle da numerosi archi detritici ravvicinati che creano dislivelli da 1 a 3 m, da elevati argini longitudinali che lo delimitano sulla sinistra idrografica, raccordandosi in parte,

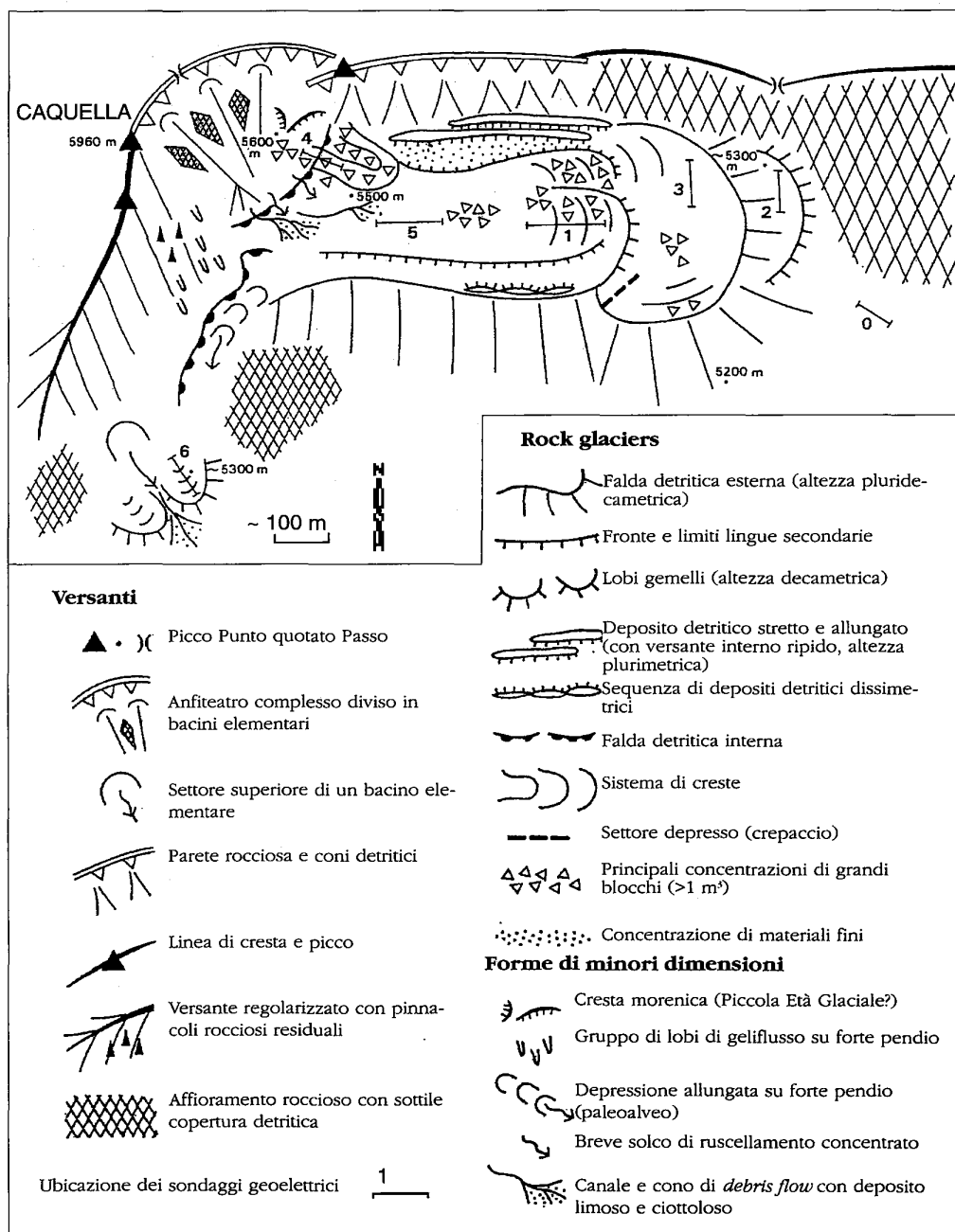


Fig. 3 – Carta geomorfologica schematica del rock glacier del Caquella (schizzo di B. Kaiser)

come si è detto, alle fasce detritiche laterali, e da una concavità che ne deprime la zona centrale. In questo settore sono visibili numerosi blocchi andesitici e a spigoli vivi (alcuni hanno un volume superiore a un metro cubo) che si concentrano in aree che vanno da un centinaio di m² a qualche decina di migliaia di m².

Nel settore superiore del *rock glacier* i cordoni longitudinali perdono gradualmente evidenza geomorfologica e si confondono in vaste falde detritiche, dalle quali emergono spuntori isolati e pinnacoli rocciosi. Un netto gradino separa il settore superiore da quello intermedio; il gradino è solcato da alvei, dovuti all'azione di lave torrentizie che creano alla loro base piatti e vasti coni, sui quali la deflazione eolica ha creato pavimenti ciottolosi. Numerosi solchi e canali intagliano anche le falde detritiche, che sommergono gran parte delle pareti rocciose, dalle quali è contenuto il settore superiore del *rock glacier*. Nella parte più interna dello pseudocirco, il cui smantellamento ha contribuito in modo sostanziale all'alimentazione detritica del *rock glacier*, a circa 5.600 m, è visibile un piccolo complesso morenico; si tratta di due brevi cordoni latero-frontali, alti un paio di metri e formati da blocchi privi di vegetazione, che segnano il limite inferiore della più recente (e più ridotta) espansione glaciale. Dal punto di vista cronologico questa espansione può essere attribuita all'Olocene (probabilmente alla Piccola Età Glaciale) ed essere raccordata con la fase 5 di Clapperton e altri (1997), segnalata sul Cerro Azanaques e sul Cerro Tunupa al di sopra di 4.700 m.

Da segnalare infine la presenza di due minuscoli *rock glaciers* poco a sud del *rock glacier* studiato. Lunghi poco più di 100 m, si estendono fra 5.200 e 5.300 m ai piedi del versante detritico dal quale sono alimentati.

La presenza di un grande *rock glacier* in quest'area pone naturalmente interessanti problemi sulla sua genesi, sulla persistenza o meno di ghiaccio all'interno e quindi sulla sua attività, sull'età di formazione e infine sulle sue relazioni con le variazioni climatiche.

La struttura interna del rock glacier del Caquella. – Per rispondere ad alcuni di questi interrogativi, in particolare per quanto riguarda la presenza di ghiaccio all'interno del corpo detritico, si sono effettuati nel luglio 1997 alcuni rilievi geofisici.

Come metodologia si sono scelte le prospezioni elettriche che, a fronte di un impegno logistico relativamente poco oneroso, possono fornire informazioni, almeno a livello semi-quantitativo, sulla presenza di ghiaccio all'interno dei corpi detritici, sulla sua tipologia (ghiaccio interstiziale, e quindi *permafrost*, oppure ghiaccio massivo), sulla sua concentrazione e sul suo spessore. Questo metodo consiste nell'iniettare nel terreno della corrente elettrica mediante un apposito circuito e nel misurare le differenze di potenziale che si creano nei vari strati del terreno stesso. Nei *rock glacier*, costituiti da ghiaccio e detrito, si registra normalmente un sensibile contrasto di resistività fra detrito, ghiaccio e basamento roccioso, come è risultato dai rilievi effettuati su numerosi *rock glaciers* alpini ed extralpini (Fabre e Evin, 1990; Smiraglia e altri, 1994; Assier,

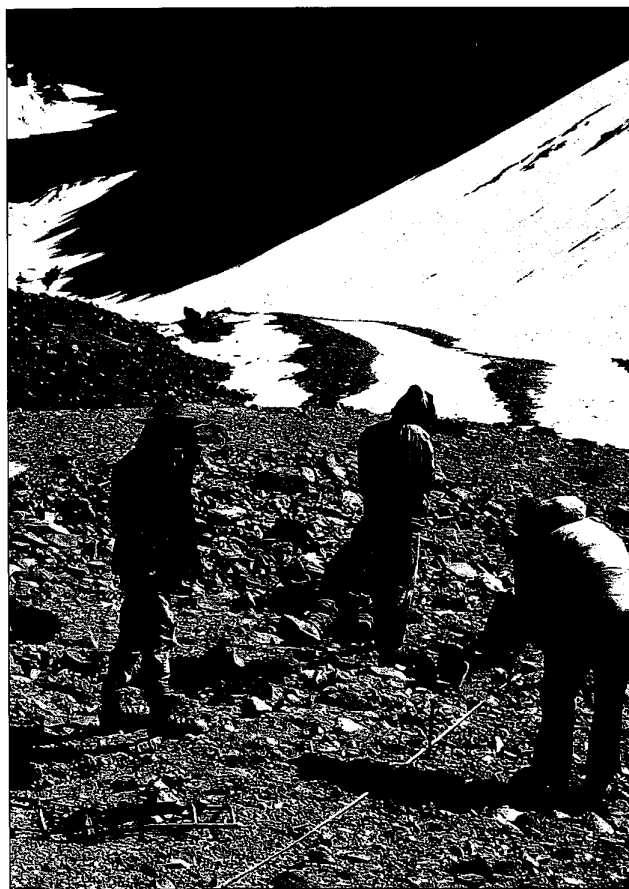


Fig. 4. – Sondaggi geoelettrici sul settore inferiore del rock glacier del Caquella (foto C. Smiraglia, 18 luglio 1997)

Si osservi la granulomeria eterogenea della superficie che alterna blocchi con materiali più fini. In secondo piano sono visibili alcune creste arcuate create dal flusso del rock glacier

Fabre e Evin, 1996; Evin e altri, 1997); una relazione semplice fra resistività e concentrazione in ghiaccio è tuttavia difficile da stabilire in quanto secondo alcuni autori in particolari condizioni il ghiaccio può divenire più conduttivo (Haeberli e Vonder Mühll, 1996).

Sul Vulcano Caquella si sono effettuati sette sondaggi, di cui cinque sulla superficie del *rock glacier*, uno al suo esterno per verificare la resistività del *bed rock* ignimbrítico e del detrito superficiale e l'ultimo su un piccolo *rock glacier* secondario a sud della colata principale (fig. 3). I rilievi sono stati compiuti con uno strumento BM1 della MAATEL Électronique di Voreppe, particolarmente adatto per sondaggi su materiali caratterizzati da forte resistività, dell'ordine cioè di decine di migliaia di Ωm (fig. 4) (per un approfondimento degli aspetti tecnici e dei problemi aperti sui rilievi geoelettrici su *rock glacier* si rimanda alla bibliografia sopra citata).

Sul *rock glacier* si sono realizzati tre sondaggi longitudinali: CAQ4 nel settore superiore a circa 5.550 m (probabilmente uno dei più elevati sondaggi di questo tipo mai effettuati); CAQ5 nel settore medio-superiore a circa 5.500 m; CAQ1 nel settore medio-inferiore poco al di sotto di 5.500 m. Due sondaggi tra-

sversali sono stati compiuti sul bordo della fronte principale a circa 5.400 m (CAQ3) e su un lobo secondario depresso a 5.350 m (CAQ2) (nella carta della fig. 3 i sondaggi sono indicati esclusivamente con il numero corrispondente).

I risultati dei sondaggi sembrano indicare che all'interno del *rock glacier* vi sia ghiaccio interstiziale a limitata concentrazione con valori di resistività apparente sempre inferiori a 40.000 Ω m (la resistività apparente è la proprietà che con il sondaggio viene misurata direttamente sul terreno, dalla cui interpretazione si ricava in un secondo tempo una stratigrafia geoelettrica del terreno stesso).

In particolare nella zona frontale (sondaggio CAQ3) l'interpretazione dei dati suggerisce uno spesso strato superficiale privo di ghiaccio, mentre non si può escludere la presenza di quest'ultimo al di sotto di 15-20 m di spessore. Nella zona intermedia il sondaggio CAQ1 indica uno strato attivo, privo cioè di ghiaccio, nei primi 2-3 m di spessore, al di sotto del quale dovrebbe essere presente uno strato di sedimenti gelati a scarsa concentrazione di ghiaccio dello spessore di 40-50 m. Poco più a monte, il sondaggio CAQ5 ha invece fornito valori di resistività apparente molto bassi, non compatibili con la presenza di ghiaccio interstiziale. Nella zona superiore il sondaggio più elevato (CAQ4), effettuato poco a valle della morena attribuita alla Piccola Età Glaciale, indica la presenza di un sottile strato di neve gelata, seguito a 15-20 m di profondità da uno strato di sedimenti a scarso tenore di ghiaccio dello spessore di pochi metri. Per quanto riguarda il sondaggio CAQ2, effettuato nel settore più basso del *rock glacier*, su un lobo secondario, si osservano ridotti valori di resistività che permettono di escludere la presenza di ghiaccio sui 15-20 m di spessore attraversati (si vedano i valori di resistività apparente e quelli interpretati, nonché le relative curve dei singoli sondaggi in Francou e altri, 1999 e Fabre e altri, 2001).

Discussione. – Per quanto riguarda la struttura interna del *rock glacier*, i sondaggi geoelettrici sembrano indicare che i sedimenti di cui è costituita questa forma sono poco ricchi di ghiaccio interstiziale e sono discontinui. Si tratterebbe quindi di un *rock glacier* in una fase di ridotta attività.

Solo un sito nel settore centrale (CAQ1) ha mostrato chiare evidenze della presenza di ghiaccio interno con uno spessore da 30 a 40 m al di sotto di 3 m di detrito privo di ghiaccio. Si tratta in ogni caso di sedimenti che contengono percentuali di ghiaccio non superiori al 30%. Tale valutazione è stata confermata anche da osservazioni dirette; il limite fra il settore inferiore e quello intermedio del *rock glacier* è infatti segnato da una frattura, particolarmente evidente sul fianco destro, che ha provocato l'abbassamento del settore inferiore e ha permesso l'affioramento del ghiaccio interno (Francou e altri, 1999). Un livello simile di ghiaccio potrebbe essere presente anche nella zona frontale, ma ad una profondità nettamente maggiore (15-20 m). Nel settore medio-superiore del *rock glacier* i valori di resistività escludono la presenza di ghiaccio, mentre nella parte più alta potrebbero esserci un livello decimetrico gelato (forse ghiaccio di rigelo) e un livello di ghiaccio di qualche metro di spessore verso 15-20 m di profondità.

La collocazione dell'origine del *rock glacier* in un ambito cronologico e climatico preciso e soprattutto l'individuazione delle sue varie fasi di attività presentano in ogni caso notevoli difficoltà. Molte sono infatti le incertezze e spesso le discordanze presenti in letteratura fra i vari autori per quanto riguarda le caratteristiche del clima attuale dell'altopiano boliviano; ancora meno conosciute e più controverse sono le condizioni climatiche dell'Ultimo Massimo Glaciale, del Tardiglaciale e dell'Olocene e le relative fasi di glaciazione e di deglaciazione.

Per quanto riguarda le diverse fasi di glaciazione le cerchie moreniche alla base del vulcano si possono attribuire alla fase umida di Tauca che secondo Grosjean (1994) e Clapperton e altri (1997), avrebbe interessato l'altopiano cileno-boliviano fra 19° S e 27° S da 15.000 a poco meno di 10.400 anni BP. Secondo il primo autore citato le espansioni glaciali, associate a un sensibile ampliamento delle superfici dei laghi, sarebbero da collegarsi a un tasso di precipitazioni annue di almeno 500 mm. Tenendo conto dei dati ottenuti in Perù e nella Bolivia settentrionale, le due morene inferiori potrebbero essere correlate all'Ultimo Massimo Glaciale (evento di Tauca, 16.000-12.000 anni BP), mentre la più alta potrebbe corrispondere alla fine del Tardiglaciale (11.000 anni BP) (Mercer e Palacios, 1977; Francou e altri, 1995). Recenti lavori di Sylvestre (1997) e di Sylvestre e altri (1998 e in corso di stampa), basati sullo studio delle diatomee lacustri, propongono un'articolazione cronologica più complessa con tre fasi umide (Tauca I-II-III) fra 16.000 e 12.000 anni BP, seguite da una fase molto secca fra 12.000 e 9.500 anni BP (fase Ticaña). L'Olocene inferiore fra 9.500 e 8.500 anni BP sarebbe caratterizzato da una fase umida (fase lacustre di Coipasa) che portò il livello di alcuni piccoli laghi del Sud Lipez a +10 m rispetto al livello attuale. Sarebbe seguita una fase arida sulle cui caratteristiche climatiche e sulla cui durata non vi è accordo fra gli autori. Secondo Sylvestre (1997), che riporta i dati di Risacher e Fritz (1992), sull'altopiano centrale vi sarebbe stata durante l'Olocene una fase estremamente arida (con precipitazioni che non superavano i 20 mm all'anno) della durata di almeno 2.000 anni; tale fase sarebbe da collocarsi nell'intervallo 7.000-2.000 anni BP. Verso 4.000 anni BP è comunque segnalata una fase umida, evidenziata da una brusca e sensibile risalita del livello del lago Titicaca (Mourguiart e Roux, 1990), mentre secondo Grosjean e altri (1995) le condizioni di aridità sarebbero perdurate fino a circa 3.000 anni BP.

E' chiaro che inserire in questo quadro cronologico incerto la formazione e l'evoluzione del *rock glacier* del Caquella diventa, in mancanza di datazioni specifiche, un esercizio poco più che speculativo.

Può comunque essere utile prospettare alcuni problemi aperti.

I periodi a forte produzione di detrito che hanno alimentato il *rock glacier* e hanno poi contribuito al suo sviluppo andrebbero ricercati nelle fasi umide o relativamente umide del Tardiglaciale o dell'Olocene. I *rock glaciers*, pur trattandosi di forme caratteristiche delle catene montuose non molto umide, necessitano infatti comunque di una certa quantità di precipitazioni (200-300 mm annui) affinché lo strato gelato raggiunga spessori tali da permetterne l'attività (Francou, 1993; Whalley e Martin, 1992).

Se si ipotizza uno sviluppo iniziato alla fine del Tardiglaciale, l'evoluzione del *rock glacier* si sarebbe svolta per 8.000-10.000 anni con varie riattivazioni, ma le sue relazioni con le varie fasi di avanzata e di ritiro dei ghiacciai sono ancora tutte da esaminare. Per quanto riguarda l'Olocene, la genesi del *rock glacier* potrebbe essere precedente o successiva alla fase di grande aridità più sopra segnalata, quindi collocarsi nell'Olocene inferiore (fase di Coipasa, 9.500-8.500 anni BP) o nell'Olocene superiore (fase umida verso 4.000-3.000 anni BP). Per attribuirne l'origine all'Olocene superiore, bisognerebbe ipotizzare che il trasferimento del detrito dal circo occidentale alla fronte su una distanza di circa 1.200 m sia avvenuto con una velocità media annua di qualche decina di centimetri (30-40 cm), velocità compatibile con le dimensioni del *rock glacier*. Se si tiene però conto del volume dei detriti mobilizzati, dell'estensione delle superfici interessate dall'erosione e di un plausibile tasso di degradazione annua delle pareti di alimentazione, si potrebbe ipotizzare un tempo almeno doppio. In tal caso si può pensare che la velocità del *rock glacier* abbia subito notevoli oscillazioni, fino ad arrivare, durante i periodi aridi a ridursi sensibilmente (attualmente nell'ambiente arido del Kunlun la velocità superficiale dei *rock glacier* è, secondo Xie Zhichu, 1983, citato da Francou, 1993, di 2-3 mm/anno).

Conclusioni. – I sondaggi geoelettrici e le osservazioni di terreno mostrano che il ghiaccio interstiziale contenuto nel *rock glacier* del Vulcano Caquella è in ridotta percentuale ed è distribuito in modo discontinuo e irregolare, il che potrebbe far supporre che questa forma sia oggi caratterizzata da una limitata attività e che si trovi in una fase di recessione.

Le morfologie attuali e la struttura interna evidenziata dai sondaggi geoelettrici sembrano in ogni caso indicare la sovrapposizione di due sistemi morfodinamici e delle forme relative, la cui attività è oggi molto differenziata: *a*) il corpo principale del *rock glacier*, costituito da crioclasti di origine periglaciale (o in parte glaciale?); è un massiccio corpo di limitata attività con una sporadica presenza, nel settore medio-inferiore della colata, di sedimenti gelati di qualche decina di metri di spessore a scarso tenore di ghiaccio; *b*) uno strato superiore con spessori sottili e discontinui di materiale gelato (anch'esso a scarso tenore di ghiaccio) derivante dal sistema morfodinamico attuale (basato sostanzialmente su processi periglaciali e gravitativi); sulla sua superficie si osservano numerosi lobi arcuati con convessità verso valle, depositi di *debris flow* e *mud flow*, oltre a depositi di frana a grandi blocchi. Vanno inoltre ricordate le testimonianze dell'attività di un sistema morfodinamico glaciale recente, probabilmente attribuibile alla Piccola Età Glaciale, in particolare il piccolo cordone morenico a circa 5.600 m.

Ogni tentativo di quantificare la durata dei vari fenomeni e la loro importanza relativa si scontra non solo con l'incertezza e l'approssimazione dei dati di partenza, ma anche con la complessità della morfologia; si osserva infatti, nell'alimentazione del *rock glacier*, una sovrapposizione dei processi crioclastici più lenti con processi di accumulo più veloci, come i *debris flow* e i *mud flow*,

cui si aggiungono fenomeni intensi di franosità che hanno accelerato lo smantellamento delle pareti andesitiche.

Quanto alle relazioni con il clima attuale, sono in corso, ad opera del gruppo di ricerca diretto da B. Francou, misure sulla velocità superficiale del *rock glacier* e sul bilancio energetico; quanto a quest'ultimo, una stazione meteorologica automatica, la cui installazione a 5.500 m è stata realizzata nel 1998, sta fornendo una serie di informazioni sulle precipitazioni, la durata della copertura nevosa, la temperatura in superficie, nello strato attivo e in profondità. In tal modo sarà possibile formulare una risposta attendibile sugli effetti del clima attuale e su una possibile fase di degradazione recente del *rock glacier*, che potrebbe divenire un indicatore importante delle variazioni climatiche in atto nella fascia tropicale.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[«BSGI» = «Bollettino della Società Geografica Italiana», Roma; «MSGI» = «Memorie della Società Geografica Italiana», Roma; «RGI» = «Rivista Geografica Italiana», Firenze; SGI = Società Geografica Italiana]

ASSIER A., D. FABRE e M. EVIN, *Prospection électrique sur les glaciers rocheux du cirque de Ste-Anne (Queyras, Alpes du Sud, France)*, in «Permafrost and Periglacial Processes», Chichester, 1996, 7, pp. 53-68.

CLAPPERTON C.M. e altri, *Late Quaternary Glacier Advances and Paleolake Highstands in the Bolivian Altiplano*, in «Quaternary International», Saint Joh's (Terranova), 1997, 38/39, pp. 49-59.

EVIN M., D. FABRE D. e P.G. JOHNSON, *Electrical Resistivity Measurements on the Rock Glaciers of Grizzly Creek (St. Elias Mountains, Yukon)*, in «Permafrost and Periglacial Processes», Chichester, 1997, 8, pp. 179-189.

FABRE D. e M. EVIN, *Prospection électrique des milieux de forte résistivité: le cas du pergélisol alpin*, in *Proceedings of the 6th International Association of Engineering Geology Congress*, Amsterdam, Balkema, 1990, pp. 927-934.

FABRE D. e altri, *Electrical Resistivity Measurements on a Tropical Rock Glacier (Caquel-la, Lipez, Bolivia)*, in *2nd Alpine Glaciological Meeting (Grenoble, 6 March 1998)*, pp. 1-4.

FABRE D. e altri, *Prospection électrique sur un glacier rocheux du domaine tropical (Caquella, Sud Lipez, Bolivie)*, in «La Houille Blanche», Parigi, 2001, 3-4, pp. 124-132.

FRANCOU B., *Hautes montagnes passion d'explorations*, Parigi, Masson, 1993.

FRANCOU B. e altri, *Balances de glaciers y clima en Bolivia y Perú: impacto de los eventos ENSO*, in «Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines», Lima, 1995, 3, pp. 661-670.

FRANCOU B. e altri, *Symptoms of Degradation in a Tropical Rock Glacier (Andes of Bolivia, 21° S)*, in «Permafrost and Periglacial Processes», Chichester, 1999, 10, pp. 91-100.

GRAF K., *Formas glaciales y periglaciales en la Cordillera Occidental entre Bolivia y Chile*, in «Acta Criogenica», 1986, 4, pp. 69-74.

- GROSJEAN M., *Paleohydrology of Laguna Letia (North Chilean Altiplano) and Climatic Implications for Late-glacial Times*, in «Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology», Amsterdam, 1994, 109, pp. 89-100.
- GROSJEAN M. e L. NUÑEZ, *Lateglacial, Early and Middle Holocene Environments, Human Occupation and Resource Use in the Atacama (Northern Chile)*, in «Geoarchaeology», Londra, 1994, 9, pp. 271-286.
- GROSJEAN M. e altri, *Holocene Environmental Changes in the Atacama Altiplano and Paleoclimatic Implications*, in «Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines», Lima, 1995, 3, pp. 585-594.
- HAEBERLI W. e D. VONDER MÜHLL, *On the Characteristics and Possible Origins of Ice in Rock Glacier Permafrost*, in «Zeitschrift für Geomorphologie», Berlino, 1996, 104, pp. 43-57.
- KASER G., *Some Notes on the Behaviour of Tropical Glaciers*, in «Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines», Lima, 1995, 3, pp. 671-681.
- KASER G., *The Nature of Tropical Glaciers*, Cambridge, Cambridge University Press, in corso di stampa.
- KLEIN A.G., B.L. ISACKS e A.L. BLOOM, *Modern and Last Glacial Maximum Snowline in Peru and Bolivia: Implications for Regional Climatic Change*, in «Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines», Lima, 1995, 3, pp. 607-617.
- MERCER J.H. e O. PALACIOS, *Radiocarbon Dating of the Last Glaciation in Peru*, in «Geology», Boulder (Colorado) 1977, 5, pp. 600-604.
- MOURGUIART P. e M. ROUX, *Une approche nouvelle du problème posé par la reconstruction des paléoniveaux lacustres: utilisation d'une fonction de transfert basée sur la faune d'ostracodes*, in «Géodynamique», 1990, 2, pp. 151-156.
- POUYAUD B., B. FRANCOU e P. RIBSTEIN, *Un réseau d'observation des glaciers dans les Andes Tropicales*, in «Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines», Lima, 1995, 3, 707-714.
- RISACHER F. e B. FRITZ, *Mise en évidence d'une phase climatique holocène extrêmement aride dans l'Altiplano central par la présence de polyhalite dans le salar de Uyuni (Bolivie)*, in «Comptes-rendus de l'Académie des Sciences», Parigi, 1992, II, pp. 1371-1377.
- SELZER G.O., *Late Quaternary Glaciation of the Cordillera Real, Bolivia*, in «Journal of Quaternary Sciences», Londra, 1992, 2, pp. 87-98.
- SMIRAGLIA C. e altri, *Les glaciers rocheux de la Manzina (Valfurva, Parc National du Stelvio, Italie). Prospection électrique*, in «Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria», Torino, 1994, 17, pp. 79-85.
- SYLVESTRE F., *La dernière transition glaciaire-interglaciaire (18.000-8.000 14C BP) des Andes tropicales du Sud (Bolivie) d'après l'étude des diatomées. Thèse de doctorat*, Parigi, Museum National d'histoire naturelle, 1997.
- SYLVESTRE F., S. SERVANT-VILDARY e M. SERVANT, *Le dernier maximum glaciaire (21.000-17.000 14C B.P.) dans les Andes tropicales de Bolivie d'après l'étude des diatomées*, in «Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences», Parigi, 1998, 327, pp. 611-618.
- SYLVESTRE F. e altri, *Lake-level Chronology in the South Bolivian Altiplano (18-23° S) during Late-Glacial and Early Holocene Times based on Radiocarbon, U/Th Ages and*

- Diatom Studies*, in «Quaternary Research», Washington, in corso di stampa.
- THOMPSON L.G. e altri, *Late Glacial Stage and Holocene Tropical Ice Core Records from Huascarán, Peru*, in «Science», Filadelfia, 1995, 269, pp. 46-50.
- THOMPSON L.G. e altri, *A 25,000-Year Tropical Climate History from Bolivian Ice Cores*, in «Science», Filadelfia, 1999, 282, pp. 1858-1864.
- VUILLE M. e C. AMMAN, *Regional Snowfall Patterns in the High Arid Andes*, in «Climatic Change», Dordrecht, 1997, 36, pp. 413-423.
- WAGNON P. e altri, *Flow Separation on Zongo Glacier, Cordillera Real, Bolivia*, in «Hydrological Processes», Londra, 1998, 12, pp. 1911-1926.
- WHALLEY W.B. e H.E. MARTIN, *Rock Glaciers. II: Models and Mechanisms*, in «Progress in Physical Geography», Londra, 1992, 16, pp. 127-186.

AN ATYPICAL ROCK GLACIER IN THE ARID TROPICAL ENVIRONMENT OF SOUTH LIPEZ (CAQUELLA VOLCANO, BOLIVIA). MORPHOLOGY AND INTERNAL STRUCTURE. – A rock glacier of large dimensions (1200 m in length and an average width of 180 m) is reported and described. The rock glacier, situated on the flanks of the Caquilla Volcano between 5300 and 5600 m in altitude (South Lipez, Bolivia), is characterized by a complex morphology and represents an unusual landform in the Tropical environment. It is probably the most important rock glacier in this climatic zone. The internal structure was analyzed by means of geoelectrical sounding. The results showed that the rock glacier presents permafrost with a very low ice content internally, in limited amounts and with a very sporadic distribution. The activity of this form appears to be quite limited at this time, whereas the periglacial and gravitational processes currently remodelling the surface are very active. The Caquilla rock glacier is the result of long-term evolution which probably continued on through the entire Holocene, although at present a precise chronological definition of the rock glacier's stages of evolution does not appear to be possible.

Université «Joseph Fourier», Grenoble, Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche Impliquant la Géologie et la Mécanique

Quito, Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération-ORSTOM

Université de Paris 1 (Panthéon-Sorbonne) et CNRS (UMR 8591), Laboratoire de Géographie Physique

Università di Milano, Dipartimento di Scienze della Terra

Grenoble, CEMAGREF