



# Internationales Symposion INTERPRAEVENT 2004 – RIVA / TRIENT

## LE COLATE DETRITICHE NELL'ARROYO DEL MEDIO (PROVINCIA DI JUJUY, ARGENTINA NORD-OCCIDENTALE)

### DEBRIS FLOWS IN ARROYO DEL MEDIO (PROVINCE OF JUJUY, NORTHWESTERN ARGENTINA)

Corrado Cencetti<sup>1</sup>, Felipe Rafael Rivelli<sup>2</sup> & Paolo Tacconi<sup>1</sup>

#### RIASSUNTO

L'Arroyo del Medio (Provincia di Jujuy, Argentina nord-occidentale), è un affluente della Quebrada de Humahuaca (Rio Grande). Nonostante le dimensioni ridotte del bacino (circa 60 km<sup>2</sup>), ingenti quantità di materiale sono mobilizzate tramite fenomeni di *debris flows* che assumono grande importanza, sia dal punto di vista morfogenetico che del rischio indotto, poiché coinvolgono infrastrutture viarie di collegamento internazionale, provocando gravi danni economici. Il materiale mobilizzato, infatti, provoca frequenti interruzioni delle vie di comunicazione e riesce, spesso, anche ad ostruire l'alveo della Quebrada, formando laghi di sbarramento. Le colate detritiche hanno costruito un conoide enorme, con un fronte alto circa 70 m ed un'estensione tale da essere agevolmente identificato nelle immagini satellitari in scala 1:1.000.000. Considerate le condizioni di rischio conseguenti a tali fenomeni e l'incidenza sullo sviluppo socio-economico del territorio, sono stati analizzati i meccanismi che producono tali processi, per elaborare un progetto che, nell'immediato, preveda di realizzare un sistema di controllo-monitoraggio, auspicando che importanti interventi strutturali favoriscano sia la mitigazione del rischio geologico-idraulico, sia la fruibilità dell'area della Quebrada.

**Parole chiave:** Ande, dinamica geomorfologica, geologia applicata, colate detritiche, rischio idrogeologico.

#### ABSTRACT

Arroyo del Medio (Province of Jujuy, northwest Argentina) is a tributary of the Quebrada de Humahuaca (Rio Grande). Although the catchment is small in area (about 60 km<sup>2</sup>), debris flows remove large amounts of materials and are important both from a morphogenetic point of view, and owing to the related risk, since they affect international road and railway systems, causing heavy economic damages. The removed material frequently causes the interruption of road and railway and also the blockage of the Quebrada, producing dam lakes. Debris flows built an enormous alluvial fan, measuring 70 metres in front's height and such an

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Perugia – Via G. Duranti 1, 06125 Perugia, Italia. E-mail: corcen@unipg.it; ptacconi@unipg.it.

<sup>2</sup> Escuela de Geología, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta – Avenida Bolivia 5150, 4400 Salta, República Argentina. E-mail: rivgeom@unsa.edu.ar.

area that can be easily recognized in the satellitary images at scale 1:1,000,000. Considering the risk conditions due to such phenomena and their influence on the social-economic development of the Quebrada, the mechanisms producing these processes were analysed, in order to plan a project which, at once, provide to realize a monitoring-alarm system, hoping that heavy structural interventions permit both the geological-hydraulic risk mitigation, and the availability of the area.

**Key words:** Andes, geomorphologic dynamics, engineering geology, debris flows, hydro-geological risk.

## INTRODUZIONE

Lo studio dell'Arroyo del Medio, nell'Argentina nord-occidentale, rientra nell'ambito delle ricerche che il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Perugia sta conducendo sulle caratteristiche morfologico-sedimentarie degli alvei ghiaiosi, in condizioni geografiche e morfoclimatiche diverse. Il fine ultimo consiste nell'analizzare i processi di dinamica fluviale e le condizioni di rischio associate alla tendenza evolutiva degli alvei, naturale e/o indotta da interventi antropici.

In particolare, nel maggio 2001, è stata avviata una convenzione tra l'Università di Perugia e l'Universidad Nacional de Salta (Argentina) che, oltre a prevedere scambi culturali tra i docenti e ricercatori delle stesse Università, si pone come obiettivo comune quello di studiare i processi di dinamica fluviale, compresi quelli legati al trasporto solido, in ambienti così diversi come quello della Cordigliera delle Ande, da una parte, e quello della Catena Appenninica dall'altra, per utili confronti che possano evidenziare al meglio l'influenza della componente antropica sulla tendenza evolutiva degli alvei fluviali.

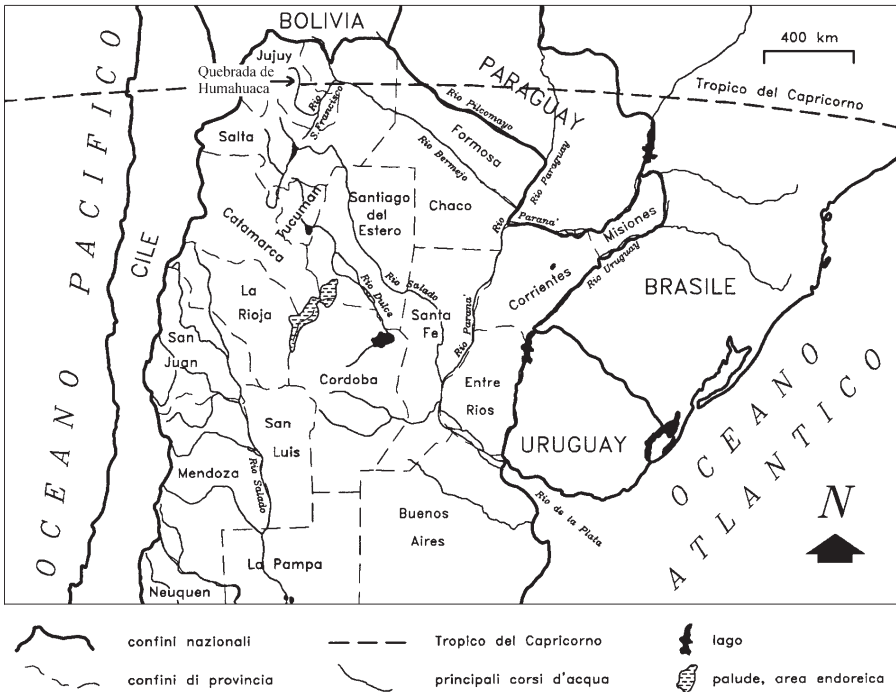
La *Cordillera*, a causa della scarsa antropizzazione che la differenzia in maniera sostanziale rispetto agli ambienti nostrani (dove la componente antropica, così importante, ha spesso stravolto gli equilibri esistenti) ben si presta all'analisi di fenomeni naturali particolari come, ad esempio, le colate detritiche (*debris flows*). Queste, nel settore di catena oggetto del presente studio, considerata l'imponenza della fenomenologia, rappresentano un elemento importante di condizionamento dei processi di dinamica fluviale e possono essere studiati in maniera esaustiva nel loro evolversi naturale, sia in termini di cause che li producono, sia di effetti nel modellamento del paesaggio, analizzando - al contempo - le eventuali condizioni di rischio collegate all'espletarsi dei fenomeni stessi.

Il bacino dell'Arroyo del Medio è, probabilmente, l'area del nostro pianeta in cui il fenomeno dei *debris flows* assume le proporzioni maggiori, tale da svolgere il ruolo di processo morfogenetico principale nell'evoluzione del paesaggio.

## CARATTERISTICHE GEOGRAFICHE E CLIMATICHE DELL'AREA DI STUDIO

L'Arroyo del Medio, meglio conosciuto come "El Volcàn", è ubicato a Nord di San Salvador de Jujuy, nella omonima provincia del Nord-Ovest argentino (Fig. 1). È un tributario della Quebrada de Humahuaca (Fig. 2) che costituisce il tratto superiore del Rio Grande de Jujuy, a sua volta sub-affluente del Rio Paraná. In Fig. 3 è visibile un dettaglio dell'area interessata dal bacino dell'Arroyo del Medio.

Garcia (1990), classificando il clima dell'Argentina in cinque province climatiche, inserisce l'area della Quebrada de Humahuaca nella "provincia andina" che risulta caratterizzata da un



**Fig1:** L'area del Nord-Ovest argentino. La Quebrada de Humahuaca, situata in corrispondenza del Tropico del Capricorno, rappresenta uno dei corsi d'acqua di testata del Rio S. Francisco che, confluendo nel Rio Bermejo, rappresenta uno dei sub-affluenti del Rio Paranà. L'Arroyo del Medio, oggetto del presente studio, è un piccolo affluente di destra della Quebrada (vedi anche figg. 2 e 3).

**Fig1:** The area of northwest Argentina. The Quebrada de Humahuaca crosses the Tropic of Capricorn and it is a stream on the head of Rio S. Francisco which is, joining with Rio Bermejo, a tributary of Rio Paranà. Arroyo del Medio (subject of this study), is a small tributary of the Quebrada (see also figs. 2 and 3).

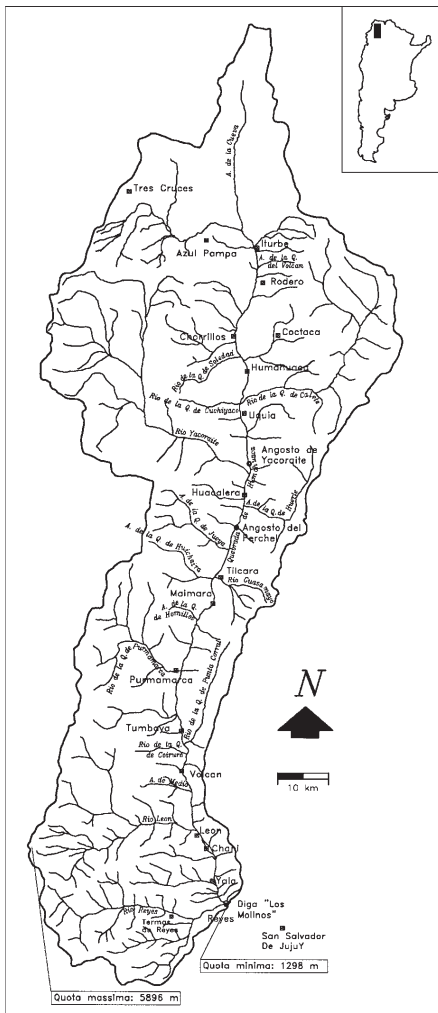
clima di montagna e alta montagna, secco a Nord del Tropico e via via sempre più umido muovendosi dal Tropico verso Sud.

Considerato lo sviluppo in senso meridiano della Quebrada, è facile immaginare quanto siano marcate, all'interno di tale bacino, le differenze climatiche, soprattutto per quanto riguarda il regime delle precipitazioni.

In particolare l'area dell'Arroyo del Medio si trova proprio nella zona di transizione tra un clima più umido (a Sud) ed uno decisamente secco, tipico di condizioni subaride (a Nord): a riprova di quanto detto, con riferimento alla Fig. 2 per la localizzazione delle stazioni pluviometriche, è sufficiente porre a confronto i dati delle precipitazioni medie annuali registrate alla stazione di Termas de Reyes (1512 mm/anno) con quelli registrati a Maimarà (119 mm/anno).

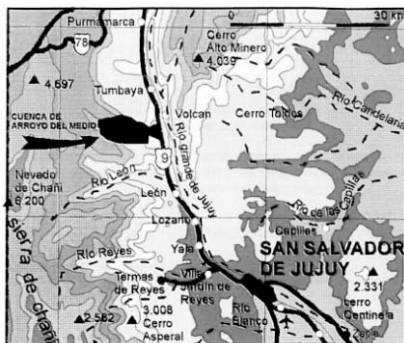
In assenza di misure dirette di precipitazioni nel bacino dell'Arroyo, è stata stimata un'altezza di precipitazioni medie annue variabile tra i 250 e i 300 mm (Bianchi e Yañez, 1991). D'altro canto, va considerata anche la differenza di quota presente in quest'area della Quebrada tra il versante occidentale e quello orientale della valle (Fig. 3).

La catena della *PreCordillera Andina* (qui rappresentata dalla Sierra de Chañi) costituisce una barriera orografica per le correnti umide provenienti dall'Atlantico, specie durante i mesi



**Fig2:** Il bacino della Quebrada de Humahuaca. Sono indicati i principali affluenti ed i più importanti villaggi dislocati lungo la valle.

**Fig2:** Quebrada de Humahuaca's watershed. The main tributaries and villages along the valley are indicated.



**Fig3:** Dettaglio dell'area della Quebrada dove l'Arroyo del Medio confluisce nel Rio Grande. Sono rappresentate anche le fasce altimetriche (in verde le quote più basse; in marrone le più elevate).

**Fig3:** A detail of the area of Quebrada de Humahuaca where Arroyo del Medio flows into the Rio Grande. The altimetric intervals (in green the lowest altitudes; in brown the highest ones) are also shown.

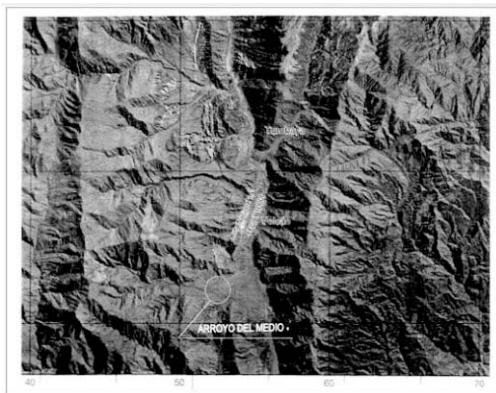
estivi e, in tal modo, favorisce maggiori afflussi rispetto al lato occidentale della Cordillera stessa.

È il regime delle precipitazioni, concentrate in brevi periodi dell'anno (soprattutto quelli estivi) e rappresentate da eventi importanti, l'elemento predisponente al verificarsi di intensi fenomeni di degradazione dei versanti (tra l'altro spogli di vegetazione) che favoriscono, a loro volta, l'innesco di colate detritiche.

Sono proprio le *coladas de barro*, come descritto più avanti, a rappresentare il processo morfogenetico principale in quest'area della Quebrada de Humahuaca.

### CARATTERISTICHE GEOLOGICHE E GEOMORFOLOGICHE

Il bacino dell'Arroyo del Medio (Fig. 4) si estende per circa 60 km<sup>2</sup> ed è ubicato in un'area montana, corrispondente alla Sierra de Chañi, caratterizzata da elevate pendenze e forte energia di rilievo.



**Fig4:** Il bacino dell'Arroyo del Medio, in un'immagine satellitare in scala 1:1.000.000. È ben evidente l'immenso cono di deiezione, alimentato da colate detritiche, che l'Arroyo forma alla confluenza con il Rio Grande (che scorre dall'alto verso il basso nella foto).

**Fig4:** Arroyo del Medio's catchment, in a digital satellitary image at scale 1:1,000,000. The enormous alluvial fan, at the confluence with Rio Grande (flowing downstairs in the photo), fed by debris and mud flows is well visible.

sia del materiale detritico quaternario che, tuttavia, rappresenta sicuramente la fonte più cospicua di sedimenti che alimentano il cono stesso.

## Geomorfologia

Dal punto di vista geomorfologico, va evidenziato che, lungo la linea di dislivello principale del bacino dell'Arroyo (fig. 6), alcuni rilievi superano abbondantemente i 4.000 m s.l.m. (C° Pabellón, 4318 m – C° Peñorco, 4584), mentre la confluenza con il Rio Grande è situata approssimativamente intorno ai 2.000 m s.l.m. Considerando che lo sviluppo in lunghezza dell'Arroyo, partendo dai fossi di testata situati nei pressi del C° Peñorco, è di circa 16,5 km, la pendenza media dell'alveo è valutabile intorno al 15%. Un gradiente elevato, che riveste molta importanza in relazione allo sviluppo delle colate detritiche che alimentano il conoide.

Il rilievo dell'intero bacino dell'Arroyo del Medio presenta due aree contrastanti, ben visibili anche solo da un esame della topografia dell'area (fig. 6); la superiore, corrispondente al settore montano, raggiunge circa l'80% della superficie totale e gioca un ruolo importante dal punto di vista climatico e idrologico, sia perché agisce come barriera orografica, trattenendo in tal modo la maggior parte dell'umidità proveniente da Est, sia perché rappresenta l'area di origine della ingente quantità di sedimenti che alimenta il settore di valle.

Il restante 20% del bacino è occupato dall'enorme conoide alluvionale che si è generato nel settore più basso del bacino, prossimo alla confluenza con il Rio Grande, dove presenta un fronte che, in alcuni tratti, raggiunge un'altezza pari a circa 70 metri.

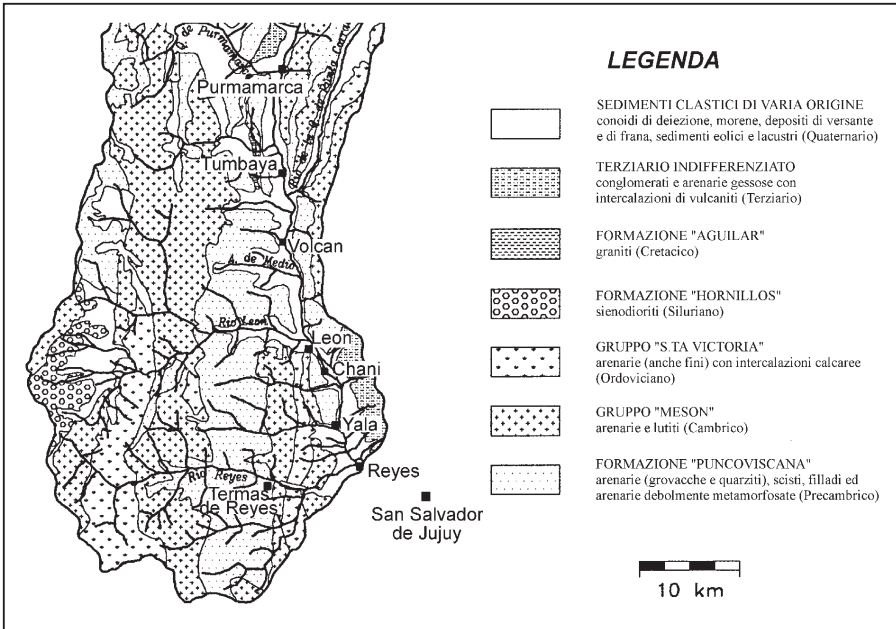
Il bacino dell'Arroyo costituisce un caso particolare dal punto di vista morfoidrologico, dato che il verificarsi di frequenti ed ingenti fenomeni di debris e mud flow genera un deposito - identificabile facilmente nelle immagini da satellite in scala 1: 1.000.000 (Fig. 4) - che costituisce un elemento sorprendente, se si considera la sproporzione esistente tra l'estensione dell'area di origine e la conformazione del materiale depositato. Il conoide influenza l'alveo

## Geologia

Dal punto di vista geologico e, in particolare, litologico-stratigrafico (fig. 5), il bacino è costituito nella sua porzione superiore da un substrato di metamorfiti di basso grado, fratturate (*Formazione "Puncoviscana"*, del Precambriano) e di arenarie quarzitiche, appartenenti al "*Gruppo Meson*" (Cambriano).

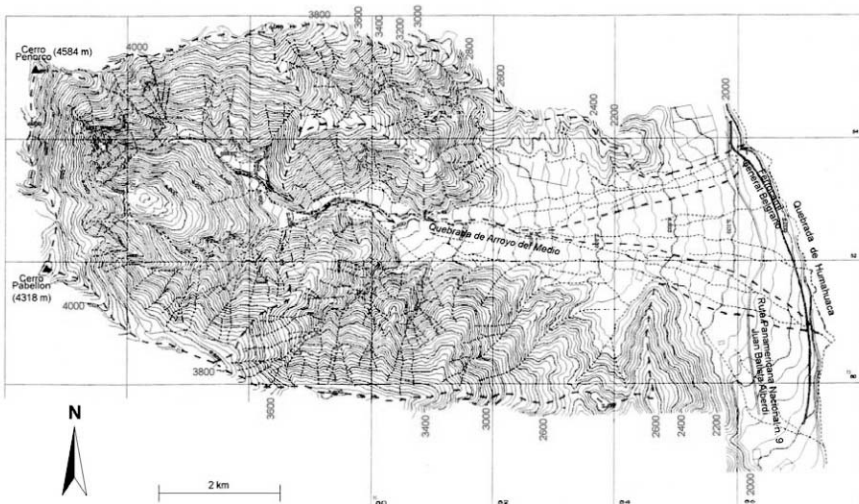
Su tale substrato poggiano, in discordanza evidente, depositi clastici quaternari poco consolidati, di origine glaciale e periglaciale (Pastore, 1936; SEGEMAR, 1998).

La porzione inferiore del bacino è invece interamente occupata da un esteso conoide di deiezione che, alimentato da colate detritiche, è tuttora attivo e si accresce tramite la rimobilizzazione sia del materiale costituente il substrato, molto fratturato,



**Fig5:** Schema geologico dell'area meridionale del bacino della Quebrada de Humahuaca, comprendente l'Arroyo del Medio. Da Cencetti et alii (2001), modificato.

**Fig5:** Geological sketch of southern part of Quebrada de Humahuaca's watershed, including Arroyo del Medio. From Cencetti et alii (2001), modified.



**Fig6:** Schema idrologico del bacino dell'Arroyo del Medio

**Fig6:** Hydrological sketch of Arroyo del Medio's catchment.

del Rio Grande per una lunghezza superiore agli 8 km, apportando al canale principale un significativo volume di sedimenti (difficilmente quantificabile) e alimentando pertanto il trasporto solido della Quebrada.

Nella morfogenesi del bacino dell'Arroyo del Medio hanno svolto un ruolo fondamentale le condizioni paleoclimatiche. Anche se l'attività dei ghiacciai pleistocenici non interessò in maniera generalizzata la regione della Quebrada, le loro evidenze sono ancora riscontrabili sui rilievi più alti, al di sopra dei 4500 m s.l.m. Nel bacino del Rio Grande le testate di alcuni suoi affluenti di destra (Reyes, León e Yacoraite) presentano i resti ben conservati di circhi glaciali ormai inattivi. Nel caso del Rio León, numerosi affluenti defluiscono inizialmente in brevi valli glaciali che presentano depositi morenici addossati ai loro fianchi vallivi.



**Fig7:** I depositi detritici quaternari costituiscono la maggiore fonte di alimentazione delle colate detritiche nell'Arroyo del Medio.

**Fig7:** Clastic sediments of quaternary period are the most important source of material for debris flows of Arroyo del Medio.

fenomeni di sollevamento, tipici delle aree di catena. Senza dubbio il volume di masse rocciose disgregate per azione meteorica nelle attuali condizioni climatiche è scarsamente significativo rispetto alla disponibilità di materiale clastico di origine paleoclimatica: senza una degradazione meteorica intensa come quella che si può supporre si sia verificata nella testata dell'Arroyo del Medio, difficilmente si sarebbe formato il conoide che esiste attualmente. Le condizioni climatiche attuali, di tipo subarido, sono caratterizzate da una drastica diminuzione delle precipitazioni rispetto al periodo geologico precedente. Tuttavia esse sono concentrate in brevi periodi dell'anno (soprattutto quelli estivi) in occasione dei quali, anche a causa della scarsità di vegetazione, limitata a poche specie xerofile, si innescano i processi di debris flow su menzionati che comportano un'ingente ed improvvisa mobilitazione del materiale detritico e che alimentano il grande conoide.

In seguito all'unica glaciazione che si verificò nel Quaternario in questa regione, si verificarono processi di degradazione meteorica di tipo fisico (essenzialmente crioclastismo) che ebbero un'intensità sicuramente molto più importante dell'attuale e generarono grandi volumi di detriti che furono - e sono tuttora - rimobilizzati tramite l'azione delle colate detritiche e delle acque di ruscellamento concentrato. I sedimenti quaternari si presentano generalmente poco consolidati, sciolti o scarsamente cementati e, pertanto, facile preda dell'erosione (Fig. 7). A ciò si aggiunge l'alta energia del rilievo, in grado di mantenere pendenze elevate sui versanti: tutta l'area è infatti interessata da intensi

## LE COLATE DETRITICHE

Tali processi di tipo gravitativo avvengono durante i mesi estivi, anche per due o tre volte in un anno, mobilizzando con facilità volumi di materiale che possono superare i 600.000 m<sup>3</sup>. Le colate detritiche (Harrington, 1943) si originano nei settori più alti del bacino. Quando il volume raggiunto dai sedimenti supera la capacità del canale di scorrimento, il materiale traccina abbandonando il carico solido all'interno del canale ed attivando nuovi canali di scorrimento. Tutto ciò accade nel settore di transizione tra la porzione superiore del bacino (di alimentazione) e l'area del conoide. In base alla fotointerpretazione ed in accordo con i dati di rilevamento sul terreno, si è potuto constatare che le colate detritiche nell'Arroyo del Medio



**Fig8:** Un canale abbandonato nel cono dell'Arroyo del Medio.

**Fig8:** An abandoned channel in the Arroyo del Medio's alluvial fan.



**Fig9:** La forte energia delle colate detritiche è testimoniata dalla presenza, all'interno dei sedimenti del conoide, di grandi massi che possono raggiungere anche i 9 m<sup>3</sup> di volume.

**Fig9:** Boulders measuring up to 9 cubic metres in volume among the sediments of alluvial fan prove the high energy of the debris flows.

teriale, secondo un processo di “autoalimentazione” che scarica la sua energia solo nella porzione inferiore del bacino, in corrispondenza del cono alluvionale. Tale processo spiega la presenza, nelle porzioni più basse del cono, di massi che possono raggiungere anche i 9 metri cubi di volume (Fig. 9), la cui mobilità non potrebbe essere spiegata altrimenti.

- **Fattori climatici.** Oltre all'importanza che le condizioni paleoclimatiche hanno avuto nella produzione di sedimenti crioclastici (che rappresentano oggi la sorgente principale di materiale mobilizzato dalle colate detritiche), vanno considerate anche le condizioni climatiche attuali, caratterizzate da rari ma intensi eventi meteorici estremi, causa diretta dell'innesco delle *coladas de barro*. Sembra, anzi, che gli eventi morfologici più importanti degli ultimi decenni (come, ad esempio, quelli del 1954 e del 1984) siano avvenuti in seguito ad eventi meteorici estremi verificatisi dopo lunghi periodi - da uno a diversi anni - caratterizzati in maniera anomala da altezze di precipitazioni medie annue molto basse (Maas et alii, 1999).
- **Fattori vegetazionali.** Come conseguenza diretta delle particolari condizioni climatiche, va

hanno, a partire dall'uscita del canale dell'area montana, un comportamento “casuale”, caratterizzato dalla mobilizzazione attraverso distinti canali che sono utilizzati per certi periodi. È possibile, infatti, osservare la presenza di diversi canali abbandonati, utilizzati in periodi anteriori ed oggi inattivi (Fig. 8).

In accordo con quanto osservato, quando il flusso mobilizza blocchi di grandi dimensioni (superiori a circa 5 metri cubi), il canale attivo può essere ostruito e, come conseguenza, il carico solido viene smistato al di fuori, magari occupando nuovamente un canale abbandonato, anche se totalmente coperto da vegetazione.

### **Fattori predisponenti**

Riassumendo, i fattori predisponenti all'innesco delle colate, in base a quanto finora esposto, possono essere considerati i seguenti:

- **Fattori topografici e morfologici.** La forte pendenza dei versanti ed i notevoli dislivelli da colmare rappresentano un elemento a favore della capacità di erosione delle acque correnti superficiali. Queste sono in grado di prendere in carico un'ingente quantità di materiale che, oltre a costituire la portata solida della massa d'acqua in movimento, favorisce la rimozione e la presa in carico di ulteriore materia-



**Fig10-11:** L'attuale canale alimentatore principale del cono alluvionale dell'Arroyo del Medio reincide i vecchi depositi di conoide, lasciando superfici terrazzate (anche molto antiche, come nella figura a destra) che oggi costituiscono la più importante fonte di alimentazione delle colate detritiche.

**Figs10-11:** The present supplying channel of the alluvial fan of Arroyo del Medio is downcutting the old fan's sediments, leading suspended, terraced surfaces (also very ancient, as you can see in the picture on the right) which at present are representing the main source of sediments for debris flows.



**Fig12:** Foto aerea del cono dell'Arroyo. Sono ben visibili: le superfici terrazzate del vecchio cono, presso l'apice; l'attuale canale alimentatore principale; la Ruta Nacional n. 9 Panamericana; l'alveo del Rio Grande, costretto ad addossarsi in sinistra idro-grafica, erodendo il versante corrispondente; l'abitato di Volcàn; uno dei laghi formatosi per lo sbarramento di un tributario del Rio Grande, con deflusso parallelo all'Arroyo, a causa dell'apporto detritico che accresce l'enorme conoide (in alto a sinistra).

**Fig12:** Aerial photo of the Arroyo's alluvial fan. You can see: the terraced surfaces of the ancient fan (next to its apex); the present main supplying channel; the Ruta Nacional No. 9 Panamericana; the riverbed of Rio Grande, induced towards its left bank, eroding the corresponding slope; the village of Volcàn; a lake, produced by the blockage of a tributary of Rio Grande, with flow parallel to Arroyo, due to the alluvial supply which is building the enormous fan (up on the left).

considerato anche che la scarsità di vegetazione, caratterizzata solo da poche specie xerofile, addirittura assenti nelle porzioni del bacino situate alle quote più elevate, è sicuramente un elemento a favore della facilità e della rapidità con cui il materiale del substrato roccioso e della copertura detritica viene eroso e trasportato, sia dalle acque di ruscellamento, sia dalle colate detritiche.

- Fattori litologico-strutturali. Va infine considerata la disponibilità di materiale sciolto o scarsamente cementato che risulta particolarmente predisposto ad essere mobilitato rapidamente ed in massa. Sia il substrato roccioso, intensamente fratturato, sia i depositi crioclastici (in proporzioni sicuramente maggiori) contribuiscono a rifornire di materiale sciolto le *coladas de barro*. Non va tuttavia trascurato che gran parte del materiale rimobilizzato in tempi recenti proviene dai vecchi depositi di conoide (Figg. 10 e 11), anche da quelli terrazzati, presenti lungo i fianchi vallivi (Gonzalez Diaz e Fauque, 1987). Grazie all'energia di cui è normalmente dotata la massa detritica mobilitata dalle colate detritiche, si verificano processi di erosione sull'antico deposito del conoide, con la presa in carico di materiale che va ad aumentare il trasporto solido in transito (Fig. 12).

Ciò è dovuto, probabilmente, anche al fatto che il canale alimentatore principale si trova oggi a quota più bassa rispetto al recente passato geologico, in conseguenza di fenomeni di sollevamento tettonico (Chayle e Agüero, 1987; Chayle et alii, 1990).



**Fig13:** Una suggestiva immagine del cono dell'Arroyo con, in primo piano, i sedimenti lacustri pleistocenici a monte di Volcàn, testimoni di un importante fenomeno di sbarramento del Rio Grande che causò la formazione di un ampio specchio lacustre.

**Fig13:** A suggestive image of the Arroyo's alluvial fan showing the pleistocenice lacustrine sediments upstream the village of Volcàn, which are the proof of an important blockage of Rio Grande producing a large dam lake.



**Fig14:** La Ruta Nacional n. 9, unica via di comunicazione terrestre tra Argentina e Bolivia, è continuamente sottoposta ad ingenti opere di manutenzione, a causa dei frequenti alluvionamenti da debris flow.

**Fig14:** Ruta Nacional No. 9, the only terrestrial connection between Argentina and Bolivia, is in continuous maintained, due to the frequent occurring debris flows.

con inusuale intensità che mobilitarono ingentissimi volumi di sedimenti, fu distrutto dopo due anni dal suo collaudo. Durante tale occasione la colata che si produsse depositò materiale sopra lo stesso per circa quattro metri di spessore (Fig. 16). La ferrovia, a causa dei ripetuti fenomeni di alluvionamento ed agli elevatissimi costi di gestione, è stata chiusa nel 1992 e lo stato di abbandono in cui versano allo stato attuale le vie di comunicazione ha prodotto un ra-

## Effetti

Gli intensi processi di movimento di massa, legati al ruscellamento ed ai debris flows, sono i responsabili della forte tendenza all'alluvionamento del fondovalle che rappresenta, tuttora, il principale elemento di rischio geologico-idraulico. Il materiale mobilizzato dalle colate raggiunge il collettore principale del Rio Grande che, spesso, viene sbarrato, così da generare un lago temporaneo. Sedimenti lacustri pleistocenici, situati a monte dell'abitato di Volcàn (Fig. 13), mostrano inequivocabilmente come fenomeni di occlusione dell'alveo, anche imponenti, si verificano fin da tempi geologici in quest'area. L'ultima grande occlusione del Rio Grande, di cui si ha memoria storica, è avvenuta nel 1945 (Castro, 2000; 2001) e produsse un lago di sbarramento lungo circa 2 km a monte dell'ostruzione. Il bacino naturale fu tempestivamente vuotato tramite l'apertura artificiale di una soglia che favorì il deflusso verso valle e che, tuttora, viene mantenuta in condizioni di efficienza per scongiurare, finché possibile, il pericolo di alluvionamenti.

Le colate detritiche incidono in modo negativo sulla realtà socio-economica della Quebrada. A farne le spese sono le vie di comunicazione internazionali che collegano

l'Argentina con la Bolivia: la *Ruta Nacional n. 9 Panamericana "Juan Batista Alberdi"* e il *Ferrocarril "General Belgrano"* (Figg. 14 e 15). Negli ultimi anni sono stati perduti due ponti carrabili in conseguenza delle colate detritiche. Uno di essi fu distrutto mentre stava per esserne ultimata la costruzione; il secondo, dopo due estati consecutive durante le quali si produssero *coladas de barro*

vido degrado socio-economico dei centri abitati presenti lungo la Quebrada, in alcuni dei quali la popolazione si è, in pochi anni, praticamente dimezzata (Cencetti et alii, 1997; 2001). Nonostante i danni evidenti che provocano tutti gli anni le colate detritiche, alla data attuale non è stato ancora effettuato nessuno studio sistematico tendente alla mitigazione del rischio geologico-idraulico. Non solo: non esistono neanche informazioni o dati attendibili sull'entità dei fenomeni (volumi mobilizzati, portata idrica e solida dell'Arroyo, velocità delle colate etc.), condizione necessaria per affrontare in maniera corretta qualsiasi ipotesi di intervento.



**Fig15:** Il Ferrocarril General Belgrano, situato presso la confluenza tra Arroyo del Medio e Rio Grande, ha subito nel tempo danni talmente gravi e ripetuti da deciderne, nel 1992, la chiusura definitiva.

**Fig15:** Ferrocarril General Belgrano, located next to the confluence between Arroyo del Medio and Rio Grande, suffered such heavy and repeated damages that the Authorities in 1992 decided its dismantling.



**Fig16:** Lo spessore di sedimenti che seppellisce la Ruta Nacional in occasione dei *Volcânes*, è spesso tale da costringere ad onerosi interventi di manutenzione.

**Fig16:** Due to the thickness of sediments of *Volcânes*, burying Ruta Nacional, heavy maintenance interventions are requested.

l'ostacolo. Occorrono importanti interventi strutturali che, pur impiegando notevoli risorse economiche, a lungo termine costituirebbero un rimedio definitivo. Ciò che si propone è la realizzazione di un'opera in sotterraneo che, partendo dalla zona meridionale, lontano dall'area interessata dagli apporti del conoide attivo, superi in galleria il conoide stesso, attestandosi ovviamente ad una profondità tale, al suo interno, da non risentire degli effetti della mobilizzazione di detrito in superficie.

## CONCLUSIONI. PROPOSTE DI INTERVENTO

La scala del fenomeno delle colate detritiche nell'Arroyo del Medio è tale da rendere estremamente complesso qualsiasi progetto di intervento teso alla mitigazione del rischio geologico-idraulico.

La realizzazione di opere a protezione delle vie di comunicazione, compresa la costruzione di ponti carrabili per evitare le colate, è del tutto aleatoria, come dimostrato dagli interventi realizzati negli ultimi anni. Si potrebbero ipotizzare interventi mirati a contenere sul nascere il fenomeno, quali una stabilizzazione dei versanti nel settore a monte e la realizzazione di strutture che riescano ad impedire ai flussi di detrito di acquistare l'energia responsabile della presa in carico di così ingenti volumi di materiale. Tuttavia, la non facile accessibilità dei luoghi, le forti pendenze ed i notevoli dislivelli, nonché la quantità del materiale mobilizzato renderebbero troppo onerosi tali interventi che risulterebbero "fuori scala". Senza contare la continua manutenzione degli interventi stessi (affinché in tempi brevi non risultino inefficaci), tale da renderli estremamente onerosi dal punto di vista economico.

Si può concludere che qualsiasi intervento sui versanti e sul reticolo idrografico dell'alto bacino dell'Arroyo del Medio non può essere preso in considerazione.

L'unica soluzione da considerare sembra quella di evitare le colate, aggirando

Tuttavia, per l'immediato, in attesa di idonei finanziamenti, l'unico intervento utile alla mitigazione del rischio è la realizzazione di un sistema di monitoraggio-allarme che, posizionato all'imboccatura del canale alimentatore attivo, sia sensibile al passaggio di materiale detritico e riesca ad attivare un allarme al fine di impedire il transito ai veicoli che si trovassero ad attraversare nel fondovalle il fronte del conoide. A tal fine potrebbe essere funzionale l'utilizzo di una serie di ecografi, disposti lungo il canale principale, che - in base allo spessore della colata in transito - siano collegati a due semafori, situati a monte ed a valle del tratto del Rio Grande interessato dal fronte del cono dell'Arroyo. La strumentazione occorrente, oltre a costi contenuti, presenterebbe il vantaggio di poter rilevare dati importanti e di sicuro interesse per uno studio sistematico delle colate detritiche dell'Arroyo del Medio.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Bianchi R., Yañez C. (1991): "Las precipitaciones en el Noroeste argentino, Salta". INTA – EERA Cerrillos.
- Castro H. (2000): "Eventos naturales y riesgo ambiental: cambios y continuidad en la Quebrada de Humahuaca (Jujuy, Argentina)". *IV Jornadas Regionales de Investigación en Humanidades y Ciencias Sociales*, San Salvador de Jujuy : Facultad de Humanidades y Ciencias Sociales de la Universidad Nacional de Jujuy (mayo de 2000).
- Castro H. (2001): "Cambios en las condiciones de riesgo ambiental en un valle andino del Noroeste argentino". *Meeting of the Latin American Studies Association*, Washington DC, September 6-8, 2001, 17 pags.
- Cencetti C., Tacconi P., Viglione F. (1997): "I debris flows della "Quebrada de Humahuaca" (Argentina nord-occidentale)". *1° Forum Italiano di Scienze della Terra FIST "GEOITALIA 1997"* (Bellaria, 5-9 ottobre 1997), Vol. Riassunti, Fasc. 2, 323 - 325.
- Cencetti C., Rivelli F.R., Tacconi P., Viglione F. (2001): "La "Quebrada de Humahuaca" (Bacino del Rio Grande de Jujuy, Argentina nord-occidentale): caratteristiche geomorfologiche di un bacino di ambiente andino". *L'Universo*, 4, 496 - 514.
- Chayle W., Agüero P. (1987): "Características de la remoción en masa en la cuenca del río Grande (quebrada de Humahuaca, Jujuy)". *Revista del Instituto de Geología y Minería*, n. 7, San Salvador de Jujuy, Universidad Nacional de Jujuy, 24 – 31.
- Chayle W., Chalabe S.A., Solis N. (1990): "El Rio Grande y sua evolucion en el tiempo geologico". *Actas del 11° Congr. Geol. Argentino*, San Juan, 1990, 1, 400-403.
- Garcia N. (1990): "Síntesis climatografica de la Republica Argentina". Publ. Fich. UNL 36/90, 31 pp., Santa Fè.
- Gonzalez Diaz E.F., Fauque L.E. (1987): "Proveniencia del material componental del torrente de barro de "El Volcán" - Quebrada de Humahuaca (Jujuy - Republica Argentina)". *Actas del 10° Congr. Geol. Argentino*, San Miguel de Tucuman, 1987, 3, 309 - 312.
- Harrington H.J. (1943): "Las corrientes de barro (mud flow) de "El Volcán", Quebrada de Humahuaca, Jujuy". *Rev. Asoc. Geologica Argentina*, Tomo 1, 2.
- Maas G., Macklin M., Sparks P., Meldrum E. (1999): "A geomorphic based record of debris flow events in the catchment of the Arroyo del Medio, northwest Argentina". DGXII – Commission of the European Communities, "Policies for sustaining environments and livelihoods in mountain areas", Project Working Paper – Prel. Rep. (08/1999), 12 pags.
- Pastore F.Y., Groeber P. (1936): "Reconocimiento geologico del torrente de barro llamado Volcán, Valle de Humahuaca, Jujuy". *An. Mus. Nac. Hist. Nat.*, 36, Buenos Aires.
- SEGEMAR (1998): "Estudio integrado de la Quebrada de Humahuaca". Instituto Tecnológico y Geominero de España, Madrid (CD-Rom).