

Dinamica geomorfologica e problematiche geologico-ambientali nel bacino del Rio Purmamarca (Provincia di Jujuy, Argentina nord-occidentale)

Corrado Cencetti¹, Felipe Rafael Rivelli², Paolo Tacconi¹

¹Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Università di Perugia (Italia). Indirizzi e-mail: Corrado Cencetti: corcen@unipg.it; Paolo Tacconi: ptacconi@unipg.it

²Escuela de Geologia, Universidad Nacional de Salta (Argentina). Indirizzo e-mail: rivgeom@unsa.edu.ar

Geomorphological dynamics and geological-environmental problems in Rio Purmamarca catchment (northwestern Argentina)

ABSTRACT: The Rio Purmamarca catchment (about 460 km²) is located in the Province of Jujuy, in northwestern Argentina, under arid climate conditions characterized by scarce rainfalls that are concentrated in the summery months. Mass movement processes (in particular debris flows) strongly are conditioning the geomorphological dynamics of the catchment and the evolution of the relief and of the riverbeds. Lithological, morphological and structural factors allow the occurring of debris flows (coladas de barro). The main streams - especially Rio Purmamarca - are systematically affected by floods which are an important factor of risk for the houses along the river, for the village of Purmamarca itself, for the works and infrastructures and for the agricultural activity of the whole district. Nevertheless the active processes are causing a permanent risk (especially when extreme meteoric events are occurring), structural projects of geological-hydraulic risk mitigation don't exist and works and infrastructures, including hydraulic works, making worse such conditions, are going on with to be realized. This is the case of the international road joining Argentina and Chile that was builded, for a long stretch, inside the riverbed of Rio Purmamarca; as well as the building of a gas pipe-line, which was located inside the same riverbed, just in the area where the greatest volume of sediments is mobilized, due to debris flow processes, and where the cross section of the riverbed is very narrow.

Key terms: geomorphological dynamics, dynamics of riverbeds, debris flows, geological-hydraulic risk

Termini chiave: dinamica geomorfologica, dinamica degli alvei fluviali, colate detritiche, rischio geologico-idraulico

Riassunto

Il bacino del Rio Purmamarca (circa 460 km²) è situato nella Provincia di Jujuy (Argentina nord-occidentale) in condizioni climatiche aride, con scarse precipitazioni concentrate nei mesi estivi. Presenta una dinamica geomorfologica condizionata essenzialmente dai processi di rimozione detritica: sono frequenti, in particolare, fenomeni di debris flows, favoriti da fattori litologici, morfologici e strutturali. I collettori principali - specialmente il Rio Purmamarca - sono interessati in maniera sistematica da fenomeni di alluvionamento che costituiscono un importante fattore di rischio per le abitazioni situate lungo il corso d'acqua, per il villaggio stesso di Purmamarca, per le opere, le infrastrutture e l'attività agricola della regione. Tuttavia, nonostante i processi in atto siano tali da determinare un rischio permanente, specie in occasione di eventi meteorici estremi, non esistono progetti strutturali di mitigazione del rischio geologico-idraulico e si continuano a realizzare opere e infrastrutture, comprese quelle di sistemazione idraulica, che aggravano tali condizioni. È il caso della strada di importanza internazionale che collega l'Argentina con il Cile, costruita per un buon tratto

all'interno dell'alveo del Rio Purmamarca; come pure della realizzazione di un gasdotto, posizionato all'interno dell'alveo, proprio nel settore dove vengono mobilizzati i maggiori volumi di sedimenti a causa dei processi di debris flow.

1. Introduzione

Il lavoro descrive i problemi di tipo geologico-applicativo ed ambientale legati alla dinamica geomorfologica di un'area dell'Argentina nord-occidentale, situata nella Cordillera delle Ande, in ambiente arido, dove i movimenti di massa (in special modo i processi di debris flow) costituiscono il principale agente di modellamento del rilievo (Chayle & Aguero, 1987; SEGEMAR, 1998; Cencetti et alii, 2001; 2004).

Oggetto dello studio è il bacino del Rio Purmamarca, un affluente di destra del Rio Grande de Jujuy (bacino del Rio Paraná, Fig. 1).

2. Caratteristiche generali del bacino

Il bacino del Rio Purmamarca è situato nelle Ande

argentine, interamente in ambiente di alta quota, e appartiene alla regione morfostrutturale denominata Cordillera Oriental.

Il bacino confina, ad Ovest, con la Regione della Puna, il vasto altopiano sudamericano che dal Perù, attraverso la Bolivia, si estende fino all'Argentina nord-occidentale.



Fig. 1 – Ubicazione dell'area di studio
Location of studied area

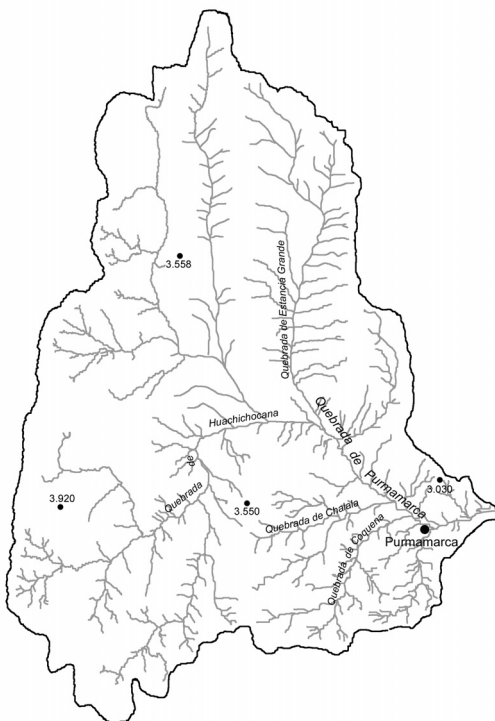


Fig. 2 – La rete di drenaggio del bacino del Rio Purmamarca
Channel network of the Rio Purmamarca catchment

Per quanto riguarda le rocce in affioramento, si ha un basamento precambrico, rappresentato da rocce metamorfiche di basso grado, completamente fratturate, e da quarziti del Cambriano; a questo seguono, stratigraficamente, rocce sedimentarie di età terziaria, rappresentate da peliti, arenarie e marne. Sono presenti anche estese coperture e depositi detritici, sia di origine alluvionale (conoidi, anche terrazzati), sia di origine gravitativa, sedimentati dal Pleistocene all'attuale (Lopez & Nullo, 1969). Tutti questi materiali, a causa dell'intensa tettonizzazione o del basso grado di consolidazione, risultano facilmente erodibili.

Molte delle testate dei diversi affluenti del Rio Purmamarca si trovano a quote prossime ai 4000 m s.l.m., fattore che risulta di fondamentale importanza, come descritto in seguito, sia per l'innescò di colate detritiche, sia per l'energia che i corsi d'acqua acquistano, in virtù della differenza di quota esistente tra l'area di testata e la confluenza del Rio Purmamarca con il Rio Grande de Jujuy, situata a circa 2200 m s.l.m..

È proprio la forte pendenza dei versanti del bacino a far prevalere il ruscellamento superficiale sull'infiltrazione, come dimostrato dal pattern dendritico assunto dalla rete di drenaggio (Fig. 2).

3. Condizioni climatiche

L'area di studio è situata in una regione arida, caratterizzata da un indice di aridità (indice di De Martonne) sempre < 5 e che risulta via via minore spostandosi verso Ovest, come conseguenza della progressiva diminuzione delle precipitazioni. Queste, nel bacino del Rio Purmamarca, sono comprese tra i 90 ed i 120 mm/anno (Garcia, 1990).

Il periodo delle piogge coincide con i mesi estivi. Generalmente si tratta di pochi eventi per anno, caratterizzati da precipitazioni intense; ogni evento, tuttavia, produce una quantità di pioggia che rappresenta una buona percentuale rispetto all'altezza di precipitazione media annua che si registra nella regione.

Precipitazioni di grandine sono frequenti in estate e possono avere una certa importanza ai fini dell'innescò delle colate detritiche, quando i grani arrivano a fusione.

Le temperature, come avviene per le precipitazioni, diminuiscono anch'esse verso occidente ma, in questo caso, come conseguenza dell'aumento di quota. Si hanno così condizioni climatiche rigorose, fredde e secche, con poche nevicate che avvengono nei settori del bacino situati a quota maggiore, durante i mesi invernali.

Le condizioni climatiche, come descritto di seguito, hanno molta importanza nella morfogenesi del bacino, soprattutto per quanto riguarda l'espletarsi di processi di degradazione meteorica (in particolare di disaggregazione fisica, quali termoclastismo e crioclastismo).

4. Morfogenesi del bacino

Prima di analizzare le relazioni tra i diversi processi

morfogenetici che regolano l'evoluzione attuale del rilievo nell'area di studio, è opportuno esaminare la "storia" geomorfologica precedente, che presenta numerose evidenze di terreno e condiziona i processi attuali. Il bacino del Rio Purmamarca, al pari di tutta la regione della Cordillera Oriental, presentava in passato condizioni climatiche più umide delle attuali, grazie all'unica glaciazione quaternaria che ha lasciato la sua impronta sui rilievi più alti (all'incirca intorno ai 4500 m s.l.m.). Non è mai stato determinato, con precisione, in quale periodo del Quaternario avvenne questo evento glaciale; tuttavia, è chiaro che la maggiore percentuale di umidità che caratterizzò il periodo suddetto (per lo meno se confrontato con le condizioni climatiche attuali) ha permesso l'attuarsi di una morfogenesi fluviale più intensa e importante, che ha dato luogo, come conseguenza, ad una produzione detritica enorme, sia per estensione, sia per volume. Tutto ciò è ben evidenziato dalla presenza di enormi conoidi alluvionali, oggi terrazzati e, in quanto tali, limitati da scarpate di erosione instabili, alte anche 30-40 metri sul thalweg attuale dei corsi d'acqua. Ottimi esempi sono visibili proprio all'interno del bacino del Rio Purmamarca (Fig. 3).



Fig. 3 – I sedimenti alluvionali quaternari, appartenenti ad antichi apparati conoidali, risultano terrazzati e limitati da scarpate alte anche 30-40 metri sul thalweg degli attuali corsi d'acqua
Alluvial quaternary sediments, of ancient fans, are terraced and they are limited by scarps 30-40 m in height over the thalweg of present streams

Nella conformazione del rilievo e nella presenza di tali morfotipi (*cono-terrazza*) ha evidentemente giocato un ruolo molto importante la neotettonica, particolarmente intensa in questo settore della Cordillera, che ha prodotto un intenso e rapido sollevamento.

È facile immaginare, fin d'ora, quale ruolo possano svolgere attualmente, nella genesi delle colate detritiche, tali depositi di origine fluviale: essi costituiscono oggi le aree di alimentazione più importanti di sedimenti per la formazione dei flussi di detrito che si riscontrano lungo il Rio Purmamarca e negli altri corsi d'acqua della stessa regione (Fig. 4).

Riguardo ai processi morfogenetici attuali, responsabili

dell'evoluzione del rilievo, questi sono caratteristici delle regioni aride.

Nella estesa conca del Rio Purmamarca la degradazione meteorica, dovuta in particolare a processi di disgregazione fisica, quali il termoclastismo, continua a produrre materiale sciolto; tale processo è più intenso nell'area di testata del bacino, a causa delle forti escursioni termiche che si registrano.

In alcuni settori protetti, sempre nelle parti più alte del bacino, il materiale sciolto riesce a trattenere acqua e, in conseguenza di ciò, si possono avere fenomeni di crioclastismo che, in questi casi, si sovrappongono al termoclastismo, contribuendo in uguale maniera alla produzione di detrito.

Per quanto già detto, le scarse precipitazioni che si producono all'interno del bacino risultano comunque molto efficaci dal punto di vista morfogenetico, a causa della loro intensità. Il tutto, aiutato dalla forte energia di rilievo e dalle forti pendenze, favorisce lo sviluppo dei processi gravitativi che giocano un ruolo decisivo come processo morfogenetico.

I processi erosivi dovuti alle acque meteoriche si manifestano lungo i pendii attraverso il ruscellamento concentrato, con la formazione di solchi di erosione che si sviluppano sul materiale detritico (Fig. 4). L'acqua, favorita in ciò dalla forte acclività del rilievo, riesce ad esplicare con efficacia la sua azione erosiva, risultando un agente decisivo quale modellatore del rilievo.

Il materiale detritico, in forma lenta ma sistematica, viene così dislocato verso i settori più bassi, per essere qui depositato e, successivamente, preso in carico dal sistema fluviale.

Riguardo all'azione modellatrice dei corsi d'acqua, sempre a causa delle scarse precipitazioni che si registrano nel bacino, le portate sono basse e limitate a periodi molto brevi dell'anno. Essi svolgono la loro attività di agenti erosivi per poche ore, a causa della torrenzialità delle piogge.

Gli stessi depositi di conoidi terrazzati risultano fortemente instabili e contribuiscono non poco ad alimentare il trasporto solido del sistema fluviale.

Le frane, generalmente di tipo traslazionale, si producono con facilità, aidate dall'elevata pendenza del versante, fattore decisivo che favorisce lo sviluppo di questi fenomeni, che durante il periodo delle piogge sono più frequenti e intensi.

Come conseguenza della caduta in alveo di tali sedimenti instabili, si producono con frequenza occlusioni temporanee degli alvei stessi, che danno luogo alla formazione di dighe naturali, temporanee, che favoriscono o deviazioni del tracciato fluviale o, più frequentemente, l'accumulo di acqua a tergo dello sbarramento. Quando il livello idrometrico supera la quota raggiunta dal materiale accumulato, si produce una rottura brusca della barriera naturale.

Si generano, così, onde di piena anomale che, con

l'aiuto della forte pendenza dell'alveo, permettono anche la mobilitazione di grandi volumi di materiale sedimentato precedentemente lungo l'alveo. È in tal modo che si innescano flussi di detrito che si spostano rapidamente verso i settori più bassi del bacino.



Fig. 4 – I sedimenti quaternari di origine fluviale costituiscono attualmente la maggiore fonte di alimentazione dei debris flows che interessano il bacino del Rio Purmamarca

Quaternary fluvial sediments are in the present the major source of debris flows affecting the Rio Purmamarca catchment

5. La tendenza all'alluvionamento e le condizioni di rischio

A causa del lavoro costante della degradazione meteorica che, ininterrottamente, genera materiale sciolto che poco a poco è mobilizzato verso gli alvei, dell'azione destabilizzante delle onde di piena sugli antichi depositi fluviali terrazzati e dell'apporto diretto di sedimenti per mezzo di processi gravitativi, la totalità dei corsi d'acqua è interessata da un aumento sistematico della quota del thalweg. Per ultimo, non certo per importanza, va considerata anche la diminuzione delle portate per motivi climatici.

Si può affermare, così, che il processo di alluvionamento è una costante nel bacino del Rio Purmamarca, come nei bacini limitrofi della stessa regione.

Infatti, a causa dell'aumento dell'apporto sedimentario e della riduzione permanente delle portate (evidenziata anche dalla perdita di aree destinate all'agricoltura, che vengono sistematicamente erose dal collettore principale e sepolte dagli apporti detritici provenienti dai tributari) il sistema fluviale è incapace di trasportare tutto il suo carico solido e l'abbandona a breve distanza; il tutto si traduce in una tendenza alla rapida aggradazione.

L'aumento di quota del thalweg dei corsi d'acqua risulta più efficace e assume un ruolo maggiore come fattore di rischio geologico in quei luoghi, situati a quote più basse, dove la pendenza del letto diminuisce ed aumenta la larghezza delle sezioni di deflusso.

Proprio questi settori del bacino sono quelli in cui si osserva una maggiore occupazione della pianura alluvionale da parte delle popolazioni della regione, che la utilizzano per la loro attività agricola, nonostante il rischio dovuto alla possibilità di alluvionamento.

Tuttavia, proprio l'alluvionabilità di tali aree provoca sistematicamente la perdita di terreno utilizzato per l'attività agricola. La conseguenza più importante è l'insorgere di problemi di natura socio-economica, poiché in tal modo viene gradualmente, ma inesorabilmente, persa la fonte più importante di reddito per le popolazioni rurali, che si trovano costrette a migrare verso le principali città della regione.

L'alluvionamento come rischio geologico permanente, normalmente non è considerato in maniera adeguata nella realizzazione di opere e infrastrutture.

Ciò è particolarmente evidente nel bacino del Rio Purmamarca, specie nel settore vallivo inferiore che comprende il villaggio omonimo.

Attualmente la località di Purmamarca si trova ad una quota inferiore di circa due metri rispetto al corso d'acqua, il che costituisce senza dubbio un reale rischio in occasione di eventuali piene.

Per proteggere il villaggio di Purmamarca è stato costruito un muro in gabbioni, lungo vari chilometri.

Questa opera non è sufficiente per fronteggiare eventuali episodi di alluvionamento, come già dimostrato in altre occasioni: per esempio nel 1974, i sedimenti trasportati in un unico evento distrussero la stazione ferroviaria, i magazzini della stessa, la strada nazionale, un ponte stradale e un edificio della Vialidad Nacional, depositando materiale, lungo un percorso di circa 20 km, che in alcuni casi ha superato i 4 metri di spessore.

È quanto meno strano che eventi di tal genere non siano stati nemmeno presi in considerazione nella realizzazione delle opere e delle infrastrutture costruite successivamente.

6. I debris flows

Una speciale considerazione, per le loro conseguenze, per la quantità dei volumi mobilizzati e per l'importanza dal punto di vista morfogenetico, meritano le colate detritiche che avvengono in corrispondenza delle zone situate a quota più bassa, all'interno dei corsi d'acqua che costituiscono il bacino del Rio Purmamarca.

È necessario puntualizzare che, nonostante l'importanza che rivestono i flussi di detrito come fattori di rischio geologico, non esiste ancora, attualmente, un sistema efficace di monitoraggio per valutare l'origine ed i volumi dei sedimenti trasportati. Di conseguenza, l'approccio al problema è ancora solo di tipo qualitativo.

Le colate detritiche si verificano durante i mesi estivi, generalmente in seguito a piogge torrenziali che riescono a saturare i detriti accumulati i quali, a causa della modifica del loro stato tensionale, possono essere mobilizzati con grande facilità verso i settori più bassi della conca, aiutati in

questo dalle forti pendenze esistenti.

I sedimenti trasportati dalle colate per la maggior parte sono depositati nell'alveo del Rio Grande, il quale altera il suo comportamento morfodinamico: in questo corso d'acqua, infatti, per la sua incapacità di trasportare il carico ricevuto, il tasso di alluvionamento è molto rapido.

Se è vero che questi flussi di detrito in maggiore o minore percentuale si osservano praticamente in tutti i tributari del Rio Purmamarca, tuttavia tre *quebradas* meritano di essere menzionate in particolare: quella di Huachichocana, quella di Estancia Grande e quella di Chalalá (Fig. 2).

Nella prima di queste, la Quebrada de Huachichocana, a causa della estensione del suo bacino, si registrano i più importanti fenomeni di debris flow, sia per la loro frequenza, sia per la quantità di volumi di sedimenti mobilizzati e, soprattutto, per i danni che essi provocano a causa della forte energia con la quale sono mobilizzati i materiali coinvolti. Qui, recentemente, è stato distrutto un ponte della Strada Nazionale n. 52 (Ruta Nacional 52), che collega l'Argentina con il Cile.

Le Quebradas di Estancia Grande e Chalalá sono di minore importanza rispetto alla precedente, per quanto riguarda la frequenza di innesco di flussi di detrito; tuttavia, anche se avvengono con più sporadicità, rivestono ugualmente un ruolo importante nella evoluzione del rilievo nel bacino del Rio Purmamarca, in quanto apportano comunque grandi volumi di materiale.

La Quebrada de Chalalá, essenzialmente per la sua ubicazione (ad Ovest dell'area urbanizzata di Purmamarca) e per la sua elevata pendenza, costituisce un rischio geologico molto elevato per questa località.

Infatti, dato che il thalweg è situato per tutto il suo sviluppo a quota superiore rispetto al villaggio di

Purmamarca, i flussi di detrito possono interessare direttamente il villaggio stesso senza incontrare nessun ostacolo, nel caso che il flusso devii dalla sua direzione principale, muovendosi dal suo margine destro verso la zona urbanizzata.

Quando questo succede, infatti, la Quebrada de Chalalá addirittura riesce a "tagliare" le due piccole quebradas che incontra nel suo cammino (la Quebrada de Coquena, la più importante tra le due, e quella situata immediatamente prima del centro abitato di Purmamarca).

Un'altra modalità attraverso la quale la Quebrada de Chalalá influenza l'innesco di flussi di detrito è, per così dire, indiretta: quando il materiale coinvolto si deposita nel collettore principale del Rio Purmamarca, si può generare un'occlusione temporanea che, quando arriva a rottura, dà luogo sia ad un'onda di piena, sia contemporaneamente ad un flusso di detrito che, entrambi mobilizzandosi lungo il suddetto Rio, senza dubbio costituiscono un serio pericolo per la località di Purmamarca, con conseguenze imprevedibili.

Purtroppo, nonostante le condizioni di rischio esistenti, non è stata adottata alcuna misura preventiva nell'area del villaggio, né nel sottobacino del Rio Chalalá, al fine di ridurre il volume di detriti che possono essere mobilizzati e ridurre la loro energia, in modo che la mobilizzazione del materiale sia più lenta e più facilmente controllabile.

7. Problematiche geoambientali indotte da interventi antropici

Il villaggio di Purmamarca è situato in prossimità della confluenza tra il Rio omonimo ed il Rio Grande, sul margine destro del primo, in un'area depressa rispetto al livello attuale dell'alveo (Fig. 5).



Fig. 5 – L'alveo del Rio Purmamarca è pensile rispetto alla pianura circostante, dove è situato il villaggio omonimo (a destra nella foto)
The riverbed of Rio Purmamarca is higher than its alluvial plain, where the village of Purmamarca is located (on the right in the picture)

La situazione, attualmente, rispetto ai due corsi d'acqua che praticamente la circondano, è più che critica, a causa del rischio permanente di tracimazione e inondazione di entrambi. A ciò si deve aggiungere quanto sopra detto a proposito dei flussi di detrito, fenomeni ricorrenti che possono allo stesso modo interessare il villaggio.

Inoltre, la realizzazione recente di alcune opere ha

aggravato le già precarie condizioni, incrementando in forma esponenziale il rischio geologico già presente.

Negli ultimi cinque anni è stato costruito, lungo l'alveo del Rio Purmamarca, un gasdotto e, successivamente, è stato posizionato - in gran parte all'interno dell'alveo - il nuovo tracciato della strada internazionale che conduce in Cile, riducendo in tal modo la sezione trasversale di

deflusso dell'alveo stesso di circa il 40% (Fig. 6).



Fig. 6 – La Ruta Nacional 52 che collega l'Argentina con il Cile, nel tratto che corre lungo la Quebrada de Purmamarca è stata costruita interamente all'interno dell'alveo del Rio omonimo
Ruta Nacional No. 52, joining Argentina with Chile. The stretch of the road along Quebrada de Purmamarca occupies a large portion of the riverbed's cross-section

È evidente che il posizionamento del tracciato della nuova strada all'interno dell'alveo riduce la sezione di deflusso di un corso d'acqua caratterizzato da un regime di tipo torrentizio, con forti pendenze, grande variabilità delle portate, enorme trasporto solido di fondo e aumenta, in tal modo, il rischio di alluvionamento e inondazione nei confronti del villaggio di Purmamarca.

Anche la presenza del gasdotto all'interno dell'alveo (a circa 2 m di profondità), può produrre conseguenze imprevedibili, proprio perché interessa il tratto del corso d'acqua dove è stata ridotta la sezione trasversale.

La diminuzione della sezione di deflusso aumenta la capacità erosiva del corso d'acqua, nonostante la tendenza generalizzata all'alluvionamento: infatti, in conseguenza dei fenomeni descritti in precedenza, alle possibili onde di piena anomale, che presentano portate importanti e sufficienti per produrre erosione, segue la sedimentazione del carico solido che produce l'aumento della quota dell'alveo.

Si consideri che, in alcuni casi, sono stati notati solchi di erosione di 1-2 metri di profondità nel letto fluviale, prima del riempimento e l'accumulo finale da parte dei sedimenti mobilizzati.

I solchi di erosione che si generano nell'alveo all'aumentare della portata costituiscono così un rischio molto alto per il gasdotto che, a causa di tale processo, può rimanere scoperto ed esposto all'impatto di blocchi anche di notevoli dimensioni che possono danneggiarlo nel momento in cui il solco di erosione stesso, prodotto nella fase precedente, viene di nuovo riempito.

Senza dubbio l'impatto dei massi sul gasdotto

costituisce un rischio elevato e potrebbe generare seri inconvenienti e danni, soprattutto nell'area dove il Rio attraversa la località di Purmamarca.

8. Opere di mitigazione del rischio

Le problematiche che presenta il bacino del Rio Purmamarca dal punto di vista geologico-applicativo sono simili a quelle di altri bacini situati nella stessa regione morfoclimatica, salvo alcuni aspetti puntuali e specifici, come l'ubicazione del villaggio omonimo che rende la situazione molto più critica.

Senza dubbio il problema più grande nel bacino del Rio Purmamarca è costituito dalle onde di piena e dai flussi di detrito: entrambi i processi potrebbero essere controllati e attenuati mediante opere di sistemazione idraulica di tutti i sottobacini.

Per questo si potrebbe ricorrere alla costruzione di opere destinate ad arrestare i sedimenti e ad attenuare l'energia della corrente, al fine di diminuire la sua capacità di trasporto e, in questo modo, il volume di materiale mobilizzato in ogni evento.

Le opere proposte potrebbero essere realizzate in gabbioni, che presentano indubbi vantaggi (una rapida risposta alle modificazioni del letto e del profilo dell'alveo, una facilità di realizzazione, la possibilità di implementazione, un basso impatto ambientale); tuttavia risulta difficile la loro realizzazione, a causa dell'elevato numero che si richiederebbe in qualsiasi programma di sistemazione. Infatti, a causa dell'estensione del bacino del Rio Purmamarca, è necessaria la realizzazione di un grande numero di briglie di ritenuta nei sottobacini, al fine di sviluppare un adeguato piano di sistemazione idraulica. Questo, senza dubbio, richiederà uno sforzo economico elevato dal quale, tuttavia, non si potrà prescindere, se si vorrà efficacemente contribuire alla mitigazione del rischio geologico-idraulico in questa regione dell'Argentina nord-occidentale.

9. Conclusioni

- Il bacino del Rio Purmamarca, nonostante le condizioni climatiche attuali, di tipo arido, mostra un'intensa dinamica geomorfologica.
- Nel bacino la presenza di sedimenti fluviali quaternari, oggi terrazzati, risulta di fondamentale importanza nell'innescare fenomeni di debris flow. L'energia di tali processi è favorita dalle forti pendenze dei versanti e degli alvei fluviali.
- L'alluvionamento è un fenomeno generalizzato nella maggior parte del bacino, soprattutto nei settori situati a quote più basse, dove la pendenza diminuisce sensibilmente e gli alvei sono soggetti, per questo, ad un aumento della quota del thalweg che li rende spesso pensili.
- Ciò comporta la perdita sistematica di terreno adibito all'agricoltura, che attualmente è la principale fonte di

- sostentamento per le popolazioni che abitano la regione.
- Il Rio Purmamarca, in particolare, costituisce un fattore di alto rischio geologico-idraulico per il villaggio di Purmamarca.
 - Le diverse opere realizzate nell'alveo del Rio Purmamarca (opere di difesa spondale, strada e gasdotto) nel settore del bacino che comprende il villaggio omonimo, aggravano le condizioni di rischio naturale in cui lo stesso versa.
 - La mobilitazione di materiale lungo il Rio Purmamarca, che raggiunge l'alveo del Rio Grande, genera problemi dal punto di vista morfodinamico anche nel comportamento di quest'ultimo.
 - Qualsiasi opera di mitigazione del rischio geologico-idraulico dovrà interessare principalmente i corsi d'acqua di testata del bacino e dovrà essere finalizzata, da una parte, a trattenere il carico solido, dall'altra a diminuire l'energia dei corsi d'acqua, inibendo i processi di colata detritica che, attualmente, costituiscono il principale processo di modellamento del rilievo.

Bibliografia

- Cencetti C., Rivelli F., 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 (luglio-agosto), 496-514. ISSN: 0041-0409.
- Cencetti C., Rivelli F.R. & Tacconi P. (2004) - Le colate detritiche nell'Arroyo del Medio (Provincia di Jujuy, Argentina nord-occidentale). Proc. of "INTERPRAEVENT 2004" (Riva del Garda, Trento, 24-28 maggio 2004), 1, III, 45-56. ISBN: 3-90 11 64-06-5.
- Chayle W. & Aguero P. (1987) - Características de remoción en masa en la cuenca del Rio Grande, Quebrada de Humahuaca, Jujuy. *Rev. del Instituto de Geología y Minería, Universidad Nacional de Jujuy (República Argentina)*, 7, 24-31.
- García N. (1990) - Síntesis climatográfica de la República Argentina. *Publ. Fich. UNL* 36, 21 pagg.
- Lopez C.R & Nullo F.E. (1969) - Geología de la margen izquierda de la Quebrada de Humahuaca, de Huacalera a Maimara, Departamento Tilcara (Prov. De Jujuy, República Argentina). *Rev. de la Asociación Geológica Argentina*, 24, 8, 173-182.
- SEGEMAR - ITGE (1998) - Estudio geológico integrado de la Quebrada de Humahuaca. Subsecretaría de Minería de la Nación, Anales 30, Buenos Aires.