

Inventario dei movimenti di terreno per analisi dei segnali InSAR nelle Alpi meridionali svizzere (periodo 1994-2007)

Stefano Mari ¹
Reynald Delaloye ¹
Cristian Scapozza ²
Tazio Strozzi ³

¹ Département. de Geosciences
Geographie
Université de Fribourg
CH - 1700 Fribourg

E-mails:
stefano.mari@unifr.ch
reynald.delaloye@unifr.ch

² Institut de Géographie
Université de Lausanne
Anthropole
CH - 1015 Lausanne

E-mail:
cristian.scapozza@unil.ch

³ Gamma Remote Sensing
Worbstrasse. 225
CH - 3073 Gümligen

E-mail:
strozzi@gamma-rs.ch

In Lambiel C., Reynard E. et Scapozza C. (Eds) (2011). *La géomorphologie alpine: entre patrimoine et contrainte. Actes du colloque de la Société Suisse de Géomorphologie*, 3-5 septembre 2009, Olivone (Géovisions n° 36). Institut de géographie, Université de Lausanne.

Riassunto

Il principale obiettivo di questo lavoro è di ottenere dei dati sui movimenti di terreno in zona di permafrost nelle Alpi meridionali svizzere, in particolare in Canton Ticino, grazie all'interferometria radar da satellite (InSAR). Questo lavoro ha permesso di inventariare 178 poligoni di movimento, con velocità variabili da cm/giorno a cm/anno. La maggior parte di questi movimenti si trova in zona di permafrost alpino (76 poligoni sono stati catalogati come rock glaciers attivi) ed in corrispondenza di ghiacciai (28 poligoni sono stati catalogati come ghiacciai coperti da detriti). I poligoni sono ripartiti abbastanza uniformemente sul territorio di studio. Si è tuttavia osservato come le velocità di movimento dei terreni occidentali siano generalmente superiori alle velocità dei terreni situati nella parte orientale del Cantone. La causa di questa differenza è da addebitare a due ragioni: in primo luogo ad una differente presenza di ghiacciai e ghiacciai coperti che influiscono sulla struttura e dinamica di molti rock glaciers presenti nelle regioni occidentali, ed in secondo luogo ad una maggiore quantità di precipitazioni annuali presenti in questa zona. Questo inventario dei movimenti di terreno ottenuti tramite InSAR, in aggiunta con lo studio di carte, foto aeree e osservazioni di terreno, è inoltre servito per l'elaborazione di un catasto dei rock glaciers delle Alpi Ticinesi.

Résumé

L'objectif principal de ce travail a été l'acquisition de données sur les mouvements de terrain en zone de pergélisol dans les Alpes méridionales suisses, en particulier dans le Canton du Tessin, à l'aide de l'interférométrie radar satellitaire (InSAR). Ce travail a permis d'inventorier 178 polygones de mouvement, avec des ordres de grandeur des vitesses allant de 1 cm par jour à 1 cm par année. La plupart de ces mouvements a été détectée en zone de pergélisol alpin. 76 polygones ont été attribués à des glaciers rocheux actifs et 28 à des glaciers couverts. Les polygones sont distribués de manière assez uniforme sur le territoire étudié. Les vitesses observées dans la partie occidentale du Canton du Tessin sont globalement plus rapides que dans la partie orientale. La cause de cette différence est probablement double : d'une part, la présence plus marquée de glaciers et de glaciers couverts à l'ouest du Tessin, qui peut influencer la structure et la dynamique de plusieurs glaciers rocheux ; d'autre part, les précipitations plus importantes dans les Alpes Tessinoises occidentales que dans le reste du Canton.

Abstract

The main goal of this research was to obtain a regional overview about permafrost creep in the Southern Swiss Alps, in particular in the Canton of Ticino. For this, a large set of space-borne Synthetic Aperture Radar interferograms (InSAR) has been analyzed. The analysis of the InSAR interferograms allowed us to inventory 178 polygons of movement, with displacement rates ranging from cm/d to cm/y. Most of the detected movements are the result of alpine permafrost creep (76 polygons have been identified as active rock glaciers) and glacier movement (28 polygons have been attributed to debris-covered glaciers). At the regional scale, there is no observable

difference in the frequency distribution of polygons between the western and the eastern part of Ticino. However, a difference concerns the velocity of the inventoried landforms (in particular the rock glaciers): in general, landforms in the western Ticino Alps tend to move more rapidly than the landforms in the eastern part. This apparent difference could be attributed, on the one hand, to the a larger number of glaciers and debris-covered glaciers and their possibly influence on the structure and dynamics of several rock glaciers in the western Ticino Alps, and, on the other hand, to larger mean annual precipitations in the latter region.

1. Introduzione

L'interferometria radar da satellite (InSAR) è stata utilizzata in passato nelle Alpi Ticinesi per lo studio di zone di particolare rilevanza scientifica e legate ai pericoli naturali (Strozzi e Valenti, 2007; Ambrosi e Strozzi, 2008). In particolare, si è data importanza al movimento di alcuni ghiacciai ticinesi ed altri casi di studio legati a zone di pericolo naturale. Le ricerche svolte finora in territorio ticinese sono sempre state di carattere locale: il principale obiettivo di questo lavoro è quindi di compilare un catasto dei movimenti di terreno in zona di permafrost nelle Alpi meridionali svizzere, in particolare in Canton Ticino. L'elaborazione di questo catasto è andato di pari passo con l'elaborazione di una mappa della distribuzione potenziale del permafrost discontinuo basata su di un catasto di rock glaciers (Scapozza e Mari, 2010). Questo strumento dovrebbe quindi rivelarsi di particolare utilità per l'interpretazione dei movimenti di versante riscontrati in zona di alta montagna.

Il catasto dei movimenti di versante elaborato sulla base dell'analisi di immagini InSAR è basato essenzialmente sulla determinazione di una forma coerente dal punto di vista geomorfologico e di una velocità media. La classificazione di questi due parametri è la stessa già impiegata in altri lavori analoghi effettuati nelle Alpi Svizzere (per. es. Delaloye et al., 2007a). Questo modo di procedere ha come obiettivo di stabilire una logica di continuità tra i differenti studi, che alla fine dovrebbero coprire un vasto territorio delle Alpi Svizzere in regioni periglaciali.

2. Inquadramento geografico e regioni di studio

Gli interferogrammi InSAR a disposizione coprono solamente la parte settentrionale del Cantone Ticino (partendo pressapoco da Biasca). La zona di studio comprende in particolare le valli Bedretto, Leventina, Blenio, Verzasca, Maggia e Riviera. Per ogni valle, l'area di studio è stata suddivisa in più regioni minori, tenendo conto dei limiti orografici ed idrografici (Fig. 1). Questa suddivisione è stata operata al fine di meglio valutare la qualità dei risultati finali, disponendo di sotto-regioni relativamente omogenee dal punto di vista morfoclimatico (presenza di vegetazione, laghi, neve, ghiacciai, esposizione dei versanti e precipitazioni). Questa suddivisione dovrebbe anche permettere di limitare le restrizioni metodologiche. La valle Bedretto è stata divisa in 2 zone: sponda destra e sponda sinistra, la Leventina in 8 zone: 4 sulla sponda destra e 4 a sinistra, la valle di Blenio in 7: 4 sulla sponda destra e 3 sulla sinistra, la Verzasca in una sola zona, la valle Maggia in 4 zone e la Riviera in 2 zone: una a destra e una sulla sinistra.

3. Materiali e metodi

La tecnica dell'interferometria radar da satellite (InSAR) consiste nella combinazione di due immagini radar da satellite acquisite da configurazioni orbitali leggermente diverse e a momenti diversi, con l'obiettivo di analizzare la differenza di fase interferometrica dei due segnali (Rosen et al., 2000). Nel nostro studio, le differenze di fase interferometrica sono state determinate per intervalli variabili da un giorno a quattro anni, tra il 1994 e il 2007. La fase interferometrica è sensibile ai cambiamenti di topografia e agli spostamenti avvenuti durante l'intervallo di tempo tra le due acquisizioni. Con la tecnica InSAR differenziale è quindi possibile ottenere una cartografia delle zone in movimento grazie a modelli numerici di terreno, che permettono di stimare e rimuovere il contributo di fase dovuto alla topografia (Strozzi et al., 2001). La chiave di lettura degli interferogrammi InSAR consiste nell'identificare le zone dove il segnale interferometrico relativo, indicato da alcuni colori, si distingue dalle zone circostanti di colori differenti. Si tratta quindi di un'interpretazione visuale soggettiva. Questa tecnica presenta comunque numerosi limiti che possono perturbare la riflessione del segnale radar dovuti alla presenza di neve, ghiaccio, acqua e vegetazione e in modo particolare dal bosco. Altri limiti della lettura degli interferogrammi sono dovuti all'orientazione dei versanti in rapporto alla linea di osservazione del satellite e alla presenza di pareti rocciose sub-verticali che possono creare delle "zone d'ombra", o di "layover" (Rosen et al., 2000).

Per questo studio, sono stati utilizzati interferogrammi prodotti dai satelliti ERS-1, ERS-2 ed ENVISAT, sia in fase ascendente (Sud => Nord) che discendente (Nord => Sud), dell'Ente Spaziale Europeo (ESA) e dai satelliti JERS-1 e ALOS PALSAR dell'Agenzia per l'Esplorazione Aerospaziale Giapponese (JAXA) e che sono stati messi a disposizione dall'Ufficio federale dell'Ambiente (UFAM / BAFU). Il trattamento dei dati e la preparazione delle immagini InSAR utilizzate è stata eseguita dalla ditta Gamma Remote Sensing. Per maggiori informazioni sulla tecnica dell'InSAR applicata allo studio del permafrost alpino, vedi per esempio Strozzi et al. (2004), Delaloye et al. (2007a, b) e Lambiel et al. (2008).

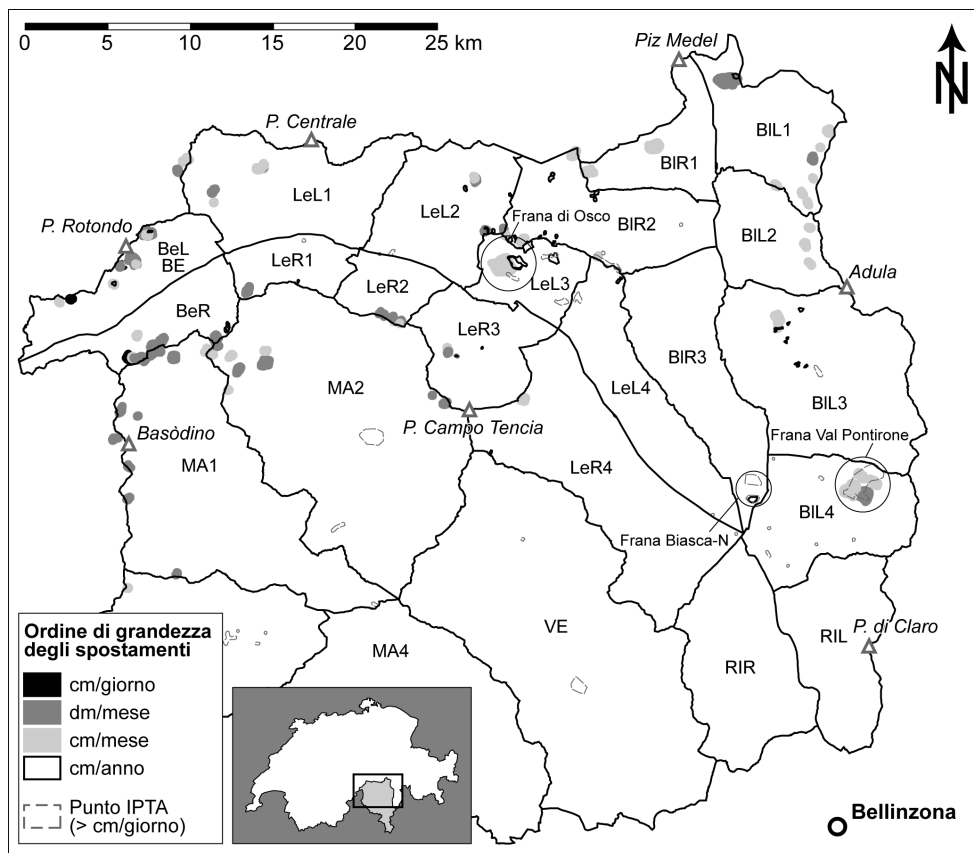


Fig. 1 : Delimitazione delle sub-regioni di investigazione e vista d'insieme dei risultati delle analisi InSAR svolte in Ticino. Sono riportati tutti i movimenti di terreno identificati senza tener conto del loro grado d'affidabilità (low/medium/high). Be = Bedretto, Le = Leventina, Bl = Blenio, Ve = Verzasca, Ma = Maggia, Ri = Riviera, L = parte sinistra della valle, R = parte destra della valle.

Oltre agli interferogrammi sopracitati, sono stati utilizzati per questo progetto due analisi IPTA, una ascendente e una discendente. IPTA (Interferometric Point Target Analysis) è un metodo InSAR che sfrutta le caratteristiche temporali e spaziali dei segnali interferometrici di un certo numero di punti riflettenti sulla superficie, spesso di origine antropica, che mostrano una coerenza a lungo termine per permettere la detezione e la quantificazione dei loro movimenti (Ambrosi e Strozzi, 2008). Le due immagini IPTA (ascendente e discendente) mostrano le velocità medie di movimenti di alcuni punti dal 1992 al 2000 che possono arrivare fino a 2 cm/anno. Il vantaggio di questa tecnica è di ricoprire una grande superficie con il segnale emesso, dalla grande precisione dei valori di spostamento ottenuti e dalla disponibilità di un registro dati risalente al 1991. Lo svantaggio invece consiste nel fatto che in zone montagnose il numero di bersagli radar stabili nel tempo è inferiore a causa della scarsa urbanizzazione, dell'estesa copertura boschiva, della copertura nevosa ad alta quota, che durante molti mesi all'anno varia sensibil-

mente la riflettività del segnale, e dalla presenza di zone in ombra rispetto al segnale radar.

Tra l'estate e l'autunno 2009 sono stati misurati in Ticino gli spostamenti mediante GPS differenziale di dieci rock glaciers attivi. Questi dati GPS sono di fondamentale importanza dato che hanno sempre confermato l'esistenza di movimenti rilevati precedentemente tramite InSAR.

4. Svolgimento

In conformità all'obiettivo di partenza, il lavoro è stato suddiviso nelle fasi seguenti:

- **Fase 1:** valutazione qualitativa degli interferogrammi.
- **Fase 2:** inventario delle zone di movimento mediante il disegno di poligoni caratterizzati da un codice, una velocità, una forma geomorfologia, un grado di affidabilità dell'interpretazione effettuata e delle osservazioni varie.
- **Fase 3:** elaborazione di un catasto dei rock glaciers grazie ai dati InSAR rilevati (fase 3) e allo studio di carte, foto aeree e osservazioni di terreno (Scapozza e Mari, 2010).
- **Fase 4:** confronto dei risultati InSAR con dati GPS rilevati su 10 rock glaciers delle Alpi Ticinesi e delle regioni limitrofe.

5. Risultati e discussione

5.1. Valutazione qualitativa degli interferogrammi (fase 1)

Questo tipo di valutazione è stato concepito in base ai dati di innevamento, di esposizione dei versanti, della stagionalità e delle condizioni meteorologiche (copertura nuvolosa). Questa tappa ha permesso di scegliere una ventina di immagini sulle 84 disponibili, che sono state analizzate nei dettagli per la compilazione dei movimenti di terreno. In particolar modo per gli interferogrammi a corto termine (da 1 giorno fino a 3 mesi), è stato importante valutare le condizioni meteo risalenti al periodo studiato. Importanti precipitazioni in alta montagna in settembre e ottobre possono infatti condizionare la qualità delle immagini per questi periodi per la presenza di neve al suolo. Questo si è verificato per gli anni 1993, 1995 e 2000. Inverni particolarmente carichi di neve come l'inverno 2000/2001 possono condizionare i dati InSAR dell'estate seguente a causa del ritardo nello scioglimento della neve. Si è cercato inoltre di effettuare una valutazione qualitativa per regione in base alla densità della copertura satellitare (Tab. 1).

Le zone studiate possono presentare un'alta qualità (*high*) quando l'immagine copre più del 90% della superficie, una qualità media (*medium*) quando la superficie ricoperta non supera il 70% ed una qualità bassa (*low*) quando non supera il 40%. Se la superficie ricoperta è inferiore al 20%, non è possibile ottenere dei dati attendibili (*zero*). Questa valutazione dipende chiaramente dall'orientazione dei versanti, i quali

presentano in linea di massima la medesima orientazione all'interno della medesima regione. Per valutare i dati IPTA si sono seguiti criteri di densità dei punti riflessi in rapporto con la superficie della zona.

Come mostra l'ultima colonna della tabella 1, 13 regioni presentano una copertura satellitare di alta qualità, 10 presentano una qualità media dato che hanno un solo interferogramma ad elevata copertura del territorio, e la regione RIR presenta una bassa qualità generale di copertura satellitare. In linea generale si può concludere che le zone con una migliore qualità si trovano generalmente a nord-ovest del cantone. Nella zona sud-est dell'area di studio la qualità della copertura satellitare cala leggermente.

Regione	ERSasc	ERSdesc	JERS	ALOS	IPTA	Qualità generale
BeR	L	H	H	M	Z	H
BeL	H	L	H	M	Z	H
LeR1	M	H	H	H	L	H
LeR2	M	M	H	H	L	H
LeR3	M	L	H	H	L	H
LeR4	L	Z	M	H	L	M
LeL1	M	M	H	H	L	H
LeL2	M	H	H	H	L	H
LeL3	M	H	H	H	M	H
LeL4	Z	H	M	M	M	M
BIR1	H	L	H	H	Z	H
BIR2	H	M	H	H	L	H
BIR3	H	Z	M	H	L	H
BIL1	L	M	H	M	Z	M
BIL2	Z	M	H	M	L	M
BIL3	L	M	H	M	L	M
BIL4	Z	M	M	L	H	M
MA1	M	L	H	M	Z	M
MA2	L	L	H	H	M	H
MA3	M	Z	H	H	L	H
MA4	Z	Z	H	M	Z	M
VE	L	L	M	M	L	M
RIR	Z	Z	L	L	L	L
RIL	Z	M	M	Z	L	M

Tab. 1 : Valutazione sulla qualità (riferita alla copertura spaziale) degli interferogrammi in base alla regione d'investigazione (L=low, M=medium, H=high, Z=zero=non disponibile). Per la localizzazione delle zone, vedi la figura 1.

5.2. Catasto dei movimenti di versante (fase 2)

Questo lavoro ha permesso finora di inventariare 178 zone/poligoni corrispondenti ai movimenti di versante (Fig. 1), con velocità variabili da cm/giorno a cm/anno. Di questi poligoni rilevati ben 160 mostrano una buona corrispondenza con il modello regionale della distribuzione potenziale del permafrost discontinuo (Scapoza e Mari, 2010). Si può constatare come i poligoni siano ripartiti abbastanza uniformemente sul territorio delle valli di Blenio, Bedretto, Leventina, e alta Valle Maggia (MA1 e MA2) ad eccezione dei fondovalle. Le regioni restanti, più meridionali, presentano altitudini medie inferiori, di conseguenza anche la distribuzione dei movimenti InSAR non presenta più la stessa omogeneità di distribuzione anche a causa della presenza di vegetazione che rende inutilizzabili gli interferogrammi.

Si è inoltre osservato come l'ordine di grandezza degli spostamenti dei terreni occidentali sia generalmente superiore a quello dei terreni situati nella parte orientale del Cantone: come mostra la figura 1, gli spostamenti occidentali sono dell'ordine medio di dm/mese, mentre nelle regioni orientali gli spostamenti che presentano un ordine di grandezza di cm/mese sono la maggioranza. La causa di questa differenza è forse da addebitare a due motivi: in primo luogo ad una differente presenza di ghiacciai e ghiacciai coperti che possono influire sulla struttura e dinamica di molti rock glaciers (in particolare durante la piccola era glaciale, PEG) presenti nelle regioni occidentali, e in secondo luogo a una maggiore quantità di precipitazioni annuali presenti in questa zona. Queste saranno quindi le ipotesi di lavoro di future investigazioni. Lavori precedenti (per. es. Delaloye et al., 2008) hanno evidenziato in Vallese alcuni movimenti veloci importanti (cm/giorno). Non sarebbe quindi un caso che questi si verificino con maggiore frequenza nei territori occidentali confinanti del Ticino, data la vicinanza geografica e quindi le comuni caratteristiche microclimatiche. Sono stati infatti inventariati una quarantina di poligoni aventi velocità dell'ordine di dm/mese (quindi comunque inferiori alle velocità dei poligoni vallesani) in particolare in Valle Bedretto, alta Leventina e alta Valle Maggia. Queste velocità corrispondono spesso a dei rock glaciers o a dei ghiacciai coperti da detriti.

Sono stati rilevati inoltre 2 grandi spostamenti in alta Valle di Blenio causati da geliflusione e 46 poligoni legati a frane, la maggior parte in zone periglaciali. Meritano tuttavia un approfondimento tre frane situate in regioni di più bassa altitudine (Fig. 1):

1. Il primo movimento corrisponde alla frana della Val Pontirone, situata in zona BIL4. Questa frana presenta velocità dell'ordine di cm/anno evidenziate in particolare dai punti IPTA. All'interno della stessa si sono però scoperte delle zone più veloci (cm/mese e dm/mese). Si tratta quindi di movimenti differenziati. I limiti di questo movimento sono ben definiti e visibili anche dalle ortofoto. Il movimento presenta una larghezza di 1500 m ed una lunghezza di circa 3 km!
2. Il secondo movimento, più piccolo e lento, si trova nella parte bassa della Valle di Blenio, sulla sponda destra del Brenno di fronte alla Buzza di Biasca. Si tratta probabilmente di ciò che resta della frana del 1513. Questo materiale sciolto tende a scendere con velocità dell'ordine di cm/anno.

3. In Leventina, sopra il comune di Osco, si sono trovati dei segnali in corrispondenza di una frana di scivolamento abbastanza estesa e complessa. La larghezza di questo movimento di terreno è di circa 3 km per la parte principale e di circa 800 m per un settore separato ad est che sembra comunque far parte della stessa struttura. La parte principale si divide in una zona occidentale più veloce (cm/mese) ed in una zona più lenta (cm/anno). Delle fessure longitudinali nella roccia visibili sulle ortofoto testimoniano della dinamicità di questo movimento discendente. Il limite inferiore non è invece visibile né dalla topografia né dai dati InSAR a nostra disposizione.

È interessante constatare come in questi tre movimenti di versante sono presenti numerosi oggetti riflettori per dati IPTA a conferma della loro dinamica. La tecnica InSAR ha confermato in questi casi l'esistenza di zone di pericolo comunque già note alle competenti autorità cantonali.

5.3. Catasto dei rock glaciers (fase 3)

L'analisi dei documenti cartografici e fotografici e il lavoro di terreno hanno permesso di censire 203 rock glaciers, di cui 56 (28%) sono stati considerati attivi (segnali InSAR evidenti), 35 (17%) inattivi (assenza di segnali InSAR) e 112 (55%) relitti (Scapozza e Mari, 2010). Poco meno della metà dei rock glacier censiti dovrebbe quindi contenere ancora del ghiaccio. A scala regionale, la distribuzione dei rock glaciers è assai omogenea, con 111 rock glacier (55%) che si situano nelle Alpi Ticesi occidentali e 92 rock glacier (45%) nelle Alpi Ticesi orientali. Questa omogeneità è confermata anche dalla densità di rock glaciers per chilometro quadrato (rg/km²): nelle Alpi Ticesi occidentali vi sono 0.09 rg/km², mentre nelle Alpi Ticesi orientali la densità è di 0.10 rg/km² (per una superficie di studio di 1200, rispettivamente 880 km²). L'omogeneità non è più presente a scala sub-regionale; i rock glacier, infatti, si concentrano di preferenza in alcune zone (Fig. 2), in particolare la catena tra la Val Lavizzara e la Val Leventina, la catena tra la Val Leventina e la Valle Santa Maria e la parte ticinese del gruppo dell'Adula.

Come per i poligoni InSAR, anche le velocità dei rock glaciers attivi rilevate con InSAR nelle Alpi Ticesi presentano delle differenze tra le regioni occidentali ed orientali del Cantone (Fig. 3). I rock glacier che si muovono a una velocità di più dm/mese sono molto più abbondanti nelle Alpi Ticesi occidentali, mentre la maggior parte dei rock glacier delle Alpi Ticesi orientali si muove a delle velocità di solo alcuni cm/anno. Il numero di rock glacier con una velocità intermedia di qualche cm/mese è invece simile tra le due regioni. La differenza di velocità tra i rock glaciers attivi delle Alpi Ticesi occidentali e orientali si può spiegare grazie a due fattori. Da una parte, tenendo conto che la porzione occidentale delle Alpi Ticesi presenta un numero maggiore di rock glaciers che sono, o sono stati, alimentati da sedimenti sciolti di origine glaciale, è probabile che questa differenza di velocità sia in parte dovuta a questa maggiore quantità di ghiaccio, rispetto ai rock glaciers di origine esclusivamente periglaciale che sarebbero mediamente più lenti. D'altra parte, è altresì probabile che vi sia un influsso importante della differenza di precipitazioni tra l'ovest e l'est delle Alpi Ticesi, che sebbene non sia estremamente marcata, potrebbe spiegare queste

differenze di velocità. In effetti, le Alpi Ticinesi occidentali beneficiano di precipitazioni annuali medie superiori a 1800-2000 mm, mentre le Alpi Ticinesi orientali sono leggermente più secche, con meno di 1800 mm di pioggia all'anno (Cotti et al. 1990; Spinedi e Isotta 2004). Il maggior apporto di acqua liquida potrebbe quindi avere l'effetto di favorire la deformazione del ghiaccio del permafrost (Ikeda et al., 2008). Questo avrebbe come effetto, a parità di condizioni topografiche e glaciologiche, di aumentare la velocità di un rock glacier (Scapoza e Mari, 2010).

Le possibili differenze di pendenza di versante, di litologia e di dimensioni dei blocchi dovrebbero inoltre venire prese in considerazione per giustificare queste differenze di velocità. Queste ipotesi saranno perciò soggetto di future investigazioni.

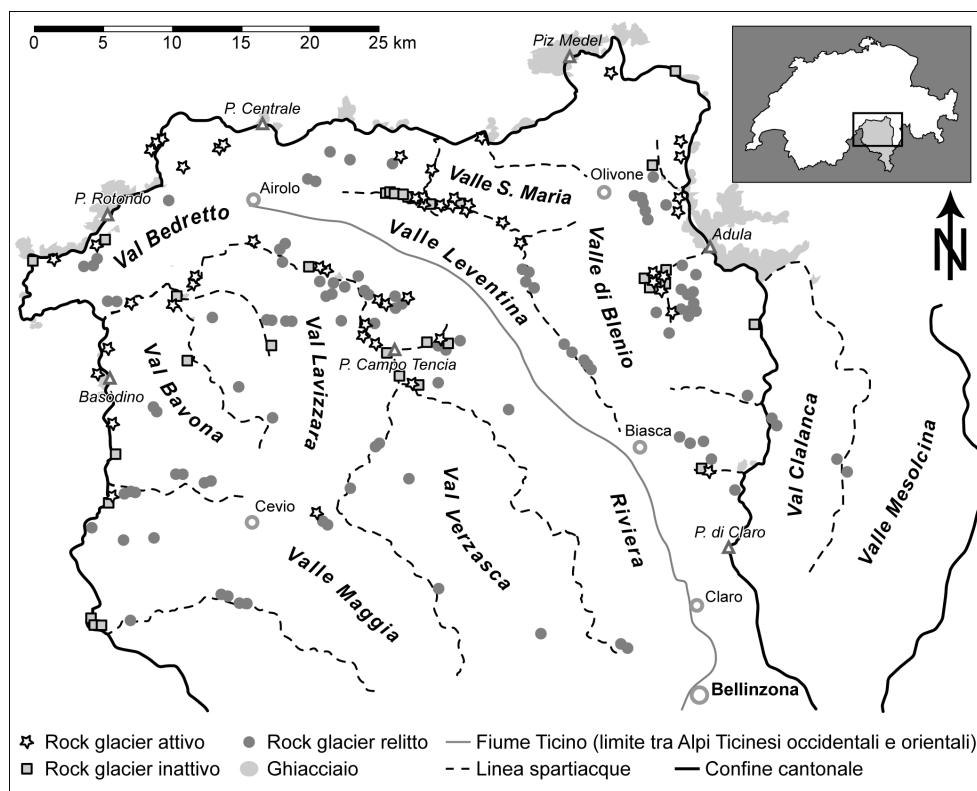


Fig. 2 : Distribuzione dei rock glacier delle Alpi Ticinesi (modificato da Scapoza e Mari, 2010). Le possibili differenze di pendenza di versante, di litologia e di dimensioni dei blocchi dovrebbero inoltre venire prese in considerazione per giustificare queste differenze di velocità. Queste ipotesi saranno perciò soggetto di future investigazioni.

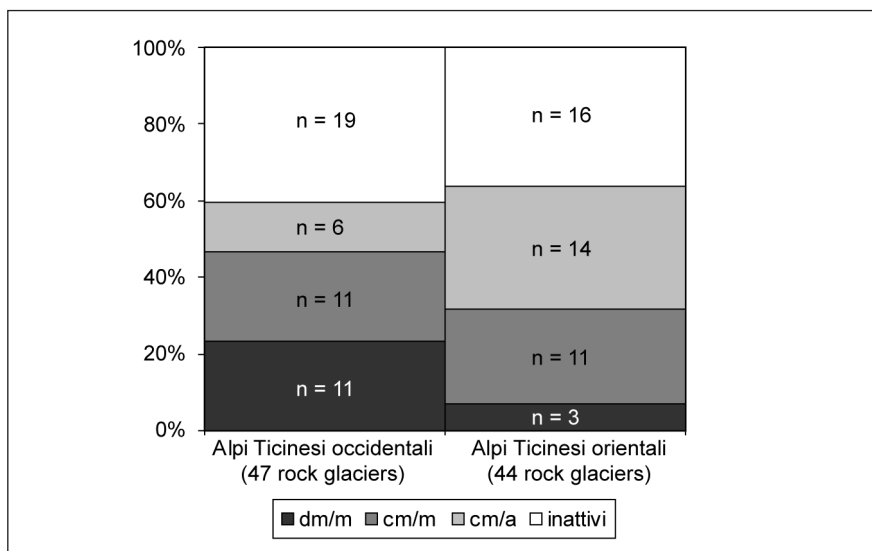


Fig. 3 : Ripartizione dei rock glacier attivi e inattivi per classe di velocità (n = numero di rock glaciers) sulla base dell'analisi degli interferogrammi InSAR (modificato da Scaפוzza e Mari, 2010).

5.4. Verifica dei movimenti InSAR con i dati GPS (fase 4)

Per questo studio sono stati scelti 10 rock glaciers attivi tra la regione del Gottardo e le Alpi Ticinesi orientali (massiccio della Cima di Gana Bianca). Questi 10 siti sono stati selezionati in base a criteri di facile accessibilità ed omogenea distribuzione sul territorio da analizzare, al fine di eseguire un monitoraggio a lungo termine con lo scopo di verificare i dati di spostamento InSAR mediante la tecnica GPS differenziale (real-time kinematics GPS). Per ogni rock glacier sono stati misurati gli spostamenti di una trentina di blocchi. Questo metodo permette di ottenere misure di spostamento con una precisione di 2 cm (Lambiel e Delaloye, 2004). Sono state condotte due campagne di terreno tra giugno ed ottobre 2009 al fine di misurare le velocità orizzontali annuali medie sulla base degli spostamenti estivi (tab. 2).

I risultati confermano prima di tutto l'esistenza degli spostamenti rilevati con InSAR. Per quanto riguarda invece la loro entità è difficile pronunciarsi con sicurezza dato che mancano ancora i dati invernali e soprattutto un monitoraggio a lungo termine. Tuttavia le differenze di velocità medie tra i differenti siti e le differenze di velocità rilevate sulle diverse parti dei rock glaciers sembrano confermare i risultati dei poligoni InSAR. È inoltre interessante notare come i rock glaciers più veloci in base alla tecnica InSAR (Monte prosa N e Cavagnoli), siano i più veloci anche con le misure GPS (su dati solo estivi); la stessa correlazione diretta è valida anche per i più lenti (Gütsch, BBerg e Klfurka) (tab. 2). In particolare spicca la velocità elevata misurata sul ghiacciaio Monte Prosa N che indica uno spostamento medio di 49 cm/anno con punte di 70 cm/anno per le parti centrali del corpo del rock glacier.

Rock glacier	Velocità media GPS (m/anno)	Velocità media InSAR (ordine di grandezza)
Monte Prosa-N	0.41	dm/mese
Cavagnoli	0.16	dm/mese
Piancabella	0.15	cm/anno
Pièi	0.15	cm/anno
Cadlimo	0.14	cm-dm/mese
Monte Prosa-S	0.13	cm/mese
Pizzo Nero	0.15	cm/mese-anno
Gütsch	0.06	cm/anno
BBerg	0.06	cm/mese
Klfurka	0.05	cm/anno

Tab. 2 : Confronto tra le velocità orizzontali annuali medie misurate con il GPS differenziale e gli spostamenti stimati grazie all'analisi di interferogrammi InSAR, in ordine decrescente sulla base degli spostamenti estivi di 10 rock glaciers rilevati con il GPS differenziale.

6. Conclusioni e sviluppi futuri

Questo lavoro ha permesso di inventariare 178 poligoni di movimento (160 in zona permafrost), con velocità variabili da cm/giorno a cm/anno ma comunque generalmente ridotte rispetto a studi analoghi compiuti in Vallese. La maggior parte di questi movimenti si trova in zona di permafrost potenziale (76 poligoni sono stati catalogati come rock glaciers attivi) e in corrispondenza di ghiacciai (28 poligoni sono stati catalogati come ghiacciai coperti da detriti). I poligoni siano ripartiti abbastanza uniformemente sul territorio delle valli di Blenio, Bedretto, Leventina, Maggia e Verzasca. A scala regionale non si sono rilevate significative differenze di distribuzione e di velocità dei movimenti. Si è tuttavia osservato come le velocità di movimento dei terreni nella parte occidentale delle Alpi Ticinesi siano generalmente superiori alle velocità dei terreni situati nella parte orientale del Cantone.

Questo elenco dei movimenti di terreno ottenuti tramite InSAR, in aggiunta con lo studio di carte, foto aeree e osservazioni di terreno, è inoltre servito per l'elaborazione di un catasto dei rock glaciers delle Alpi Ticinesi, il quale a sua volta ha costituito la base per la scelta di 10 siti di monitoraggio a lungo termine degli spostamenti di queste forme geomorfologiche. In questo senso, si prevede quindi di continuare con il monitoraggio a medio termine con lo scopo di verificare i dati InSAR riguardo la dinamica di 10 rock glaciers. Per raggiungere questo obiettivo si continueranno le investigazioni GPS iniziate durante l'estate 2009, mentre per approfondire le caratteristiche strutturali si farà ricorso a monitoraggio termico e geoelettrico. Si vorrebbe inoltre confrontare la dinamica dei rock glaciers sud alpini con quella dei rock glaciers del nord delle Alpi in relazione ai differenti regimi di precipitazioni (acqua e neve) e di durata di innevamento.

Ringraziamenti

Un particolare ringraziamento va all'Ufficio federale dell'ambiente che ha messo a disposizione per questo progetto i dati InSAR, la copertura completa di ortofoto e carte topografiche, nonché a Gamma Remote Sensing per il trattamento dei dati e la preparazione delle immagini InSAR.

Referenze bibliografiche

- Ambrosi, C. et Strozzi, T. (2008). Studio dei fenomeni franosi in Ticino: foto interpretazione e analisi delle deformazioni con interferometria radar da satellite. *Bollettino della Società ticinese di Scienze naturali*, 96 : 19-27.
- Cotti, G., Felber, M., Fossati, A., Lucchini, G., Steiger, E. et Zanon, P.L. (1990). *Introduzione al paesaggio naturale del Cantone Ticino. Tomo primo : le componenti naturali*. Bellinzona : Dipartimento dell'Ambiente, 484 pp.
- Delaloye, R., Lambiel, C., Lugon, R., Raetzo, H. et Strozzi, T. (2007a). ERS InSAR for detecting slope movement in a periglacial mountain environment (western Valais Alps, Switzerland). *Proceedings HMRSC-IX, Graz, 14-15 Sept. 2006. Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung*, 43 : 113-120.
- Delaloye, R., Lambiel, C., Lugon, R., Raetzo, H. et Strozzi, T. (2007b). Typical ERS InSAR signature of slope movements in a periglacial mountain environment (Swiss Alps). *Proceedings 'Envisat Symposium 2007', Montreux, Switzerland 23-27 April 2007 (ESA SP-636, July 2007) : 3P7*.
- Delaloye, R., Perrouchoud, E., Lambiel, C. et Lugon, R. (2008). *InSAR Haut-Valais, inventaire des mouvements de terrain par analyse de signaux d'interférométrie radar satellitaire (période 1993-2000)*. Berne : Office fédéral de l'environnement (OFEV), rapport final.
- Ikeda, A., Matsuoka, N. et Kääh, A. (2008). Fast deformation of perennially frozen debris in a warm rock-glacier in the Swiss Alps: an effect of liquid water. *Journal of Geophysical Research*, 113 : F01021.
- Lambiel, C. et Delaloye, R. (2004). Contribution of the real-time kinematic GPS in the study of creeping mountain permafrost: examples from the western Swiss Alps. *Permafrost and Periglacial Process*, 15 : 229-241.
- Lambiel, C., Delaloye, R., Strozzi, T., Lugon, R. et Raetzo, H. (2008). ERS InSAR for detecting the rock glacier activity. *Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska, 29 June – 3 July 2009 : 1019-1024*.
- Rosen, P., Hensley, S., Joughin, F.I., Madsen, S., Rodriguez, E. et Goldstein, R. (2000). Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88(3) : 333-382.
- Scapozza, C. et Mari, S. (2010). Catasto, caratteristiche e dinamica dei rock glaciers delle Alpi Ticinesi. *Bollettino della Società ticinese di Scienze naturali*, 98 : 15-29.
- Spinedi, F. et Isotta, F. (2004). Il clima del Ticino negli ultimi 50 anni. *Dati, statistiche e società*, 4(2) : 4-39.
- Strozzi, T. et Valenti, G. (2007). Misura del movimento superficiale dei ghiacciai ticinesi con interferometria radar da satellite. *Bollettino della Società ticinese di Scienze naturali*, 95 : 85-88.

- Strozzi, T., Wegmüller, U., Tosi, L., Bitelli, G. et Spreckels, V. (2001). Land subsidence monitoring with differential SAR interferometry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67(11) : 1261-1270.
- Strozzi, T., Kääh, A. et Frauenfelder, R. (2004). Detecting and quantifying permafrost creep from in situ inventory, space-borne radar interferometry and airborne digital photogrammetry. *International Journal of Remote Sensing*, 25 : 2919-2931.