GEOHAZARD MONITORING GROUP | irpi

RELAZIONE CONCLUSIVA
DELLE ATTIVITA' 2016

SISTEMA DI MONITORAGGIO SPERIMENTALE DEL FRONTE GLACIALE DEL GHIACCIAIO DI PLANPINCIEUX

Ghiacciaio di Planpincieux
Courmayeur (AO)

DATA PUBBLICAZIONE
21/12/2016

irpi
Consiglio Nazionale delle Ricerche
Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica

RELAZIONE CONCLUSIVA
DELLE ATTIVITA' 2016

SISTEMA DI MONITORAGGIO SPERIMENTALE DEL FRONTE GLACIALE DEL GHIACCIAIO DI PLANPINCIEUX

Ghiacciaio di Planpincieux
Courmayeur (AO)

DATA PUBBLICAZIONE
21/12/2016

irpi
Consiglio Nazionale delle Ricerche
Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica

AUTORI
Dott. Geol. Daniele Giordan
Dott. Ing. Paolo Allasia
Dott. Niccolò Dematteis

Indice

Acronimi e Abbreviazioni 1
1. INTRODUZIONE 2
2. RESOCONTO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE 2
2.1. DATI ACQUISITI 3
2.2. PIXEL OFFSET 4
2.2.1 STIMA DELL'ERRORE 5
2.3. CONVERSIONE PIXEL-METRICA 6
2.3.1. ORTORETTIFICA 8
2.4. EAPOE 8
2.5. RISULTATI 9
2.6. CAMPAGNE GB-SAR 10
2.6.1 Campagna 2015 12
2.6.2 Campagna 2016 13
2.7. CINEMATICA 3D 13
3 CONSIDERAZIONI FINALI 16

Acronimi e Abbreviazioni

FMS	Fondazione Montagna Sicura
CNR	Consiglio Nazionale delle Ricerche
IRPI	Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica
GMG	Geohazard Monitoring Group
GB-SAR	Ground-Based Synthetic Aperture Radar
LiDAR	Light Detection and Ranging
LOS	Line Of Sight

1. INTRODUZIONE

Il presente documento costituisce il report finale delle attività di ricerca svolte dal CNR IRPI per lo sviluppo di un sistema di monitoraggio del ghiacciaio di Planpincieux. Tali attività sono state svolte nell'ambito di un contratto tra il CNR IRPI e Fondazione Montagna Sicura siglato il 15 maggio 2015.

L'attuale progetto è la prosecuzione di quello attivo nel periodo 2013-2015 e prevede il perfezionamento delle procedure di analisi tramite tecnica di Pixel Offset per la stima delle deformazioni superficiali del ghiacciaio.

Nel corso del 2016 il monitoraggio ha continuato l'attività di raccolta dati e i risultati sono stati illustrati in report quindicinali emessi periodicamente dal CNR IRPI. Contemporaneamente, è proseguita l'attività di ricerca relativa allo sviluppo delle tecniche di monitoraggio.

Il sistema proposto ed installato è operativo sulla vetta del Mon de La Saxe dal settembre 2013 e, a parte una serie di fermi macchina dovuti alle condizioni invernali, ha permesso di acquisire con continuità i dati durante tutti i periodi estivi e di ottenere un dataset robusto che consente di raggiungere un grado di conoscenza del ghiacciaio di Planpincieux difficilmente ottenibile con altri sistemi.

La bontà e la rilevanza scientifica dei risultati conseguiti sono certificati dalla prossima pubblicazione di un articolo scientifico (presente in allegato) che è stato accettato dalla rivista internazionale *Sensors* e che diverrà ufficiale nei primi mesi del 2017.

2. RESOCONTO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE

Durante il 2016 la stazione di monitoraggio ha continuato ad acquisire con costanza le immagini come da scheduling, dimostrando l'efficacia delle modifiche tecniche effettuate a inizio 2015, rivolte anche a garantire una maggior resistenza ad eventi atmosferici estremi. Si rammenta infatti come nel febbraio 2015 la stazione venne seriamente danneggiata dalla tempesta di vento che interessò questo settore della Valle d'Aosta, con raffiche a 190 km/h. In seguito a tali danni, il sistema è stato completamente ricostruito e potenziato, realizzando un irrobustimento della struttura in grado di sopportare queste condizioni estreme.

Nel 2016, al termine della stagione invernale è stato compiuto un sopralluogo che ha verificato l'integrità e la funzionalità dei sistemi di monitoraggio (Figura 1) e, a partire da maggio, è stato possibile ricominciare la stesura dei report quindicinali sull'attività di monitoraggio.

Come da contratto, nel corso dell'anno la ricerca si è concentrata sullo sviluppo della tecnica di trattamento delle immagini denominata Pixel Offset ed in particolar modo sulla conversione metrica delle misure di deformazione rilevate dal sistema.

Oltre alle attività previste dal contratto, il CNR IRPI ha investito delle proprie risorse per portare avanti la sperimentazione di una serie di sensori GB-SAR di ultima generazione, rendendo quest'area una delle più monitorate dell'arco Alpino. Infatti, la concentrazione di sistemi tecnologicamente avanzati nel gruppo delle Jorasses rende questo settore un autentico laboratorio a cielo aperto per lo sviluppo di tecniche di monitoraggio delle dinamiche che caratterizzano i ghiacciai ivi presenti e costituisce un'occasione unica per lo sviluppo di metodologie applicabili a contesti analoghi, permettendo una migliore valutazione delle dinamiche di deformazione superficiale dei ghiacciai.

Le campagne di misura GB-SAR sono state condotte nel settembre 2015 (con un sensore IDS, Ingegneria Dei Sistemi) e nel giugno 2016 (con un sensore di ultima generazione MetaSensing). I risultati di tali campagne, benché non previsti dal contratto, saranno presentati sinteticamente nei capitoli successivi in quanto rappresentano un valore aggiunto importante agli studi condotti.

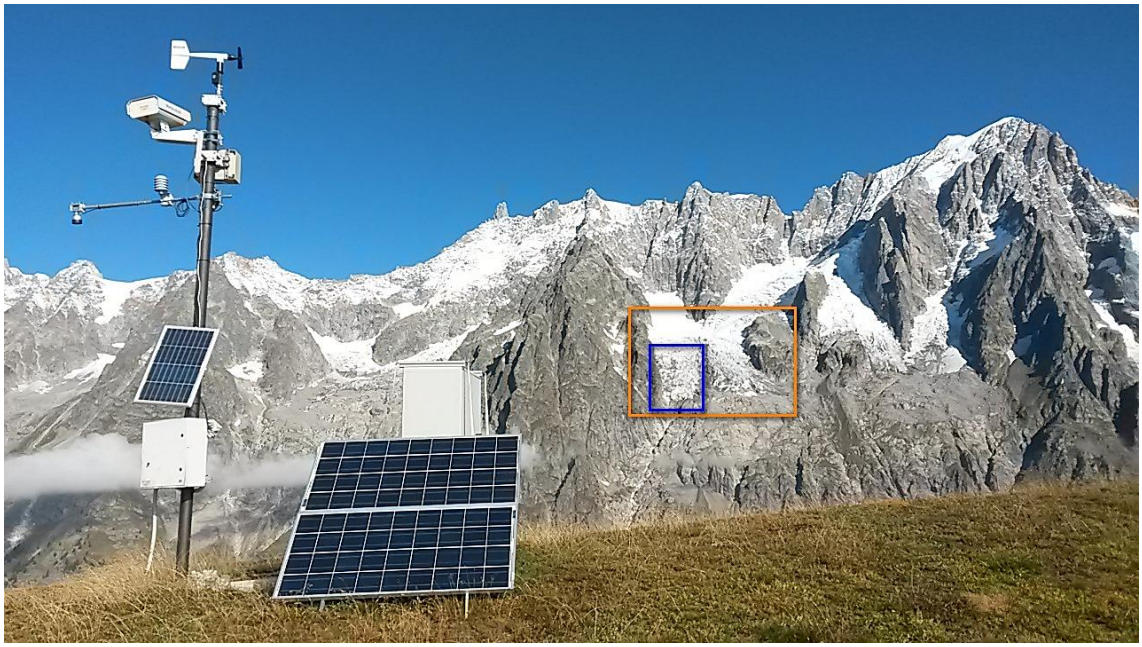


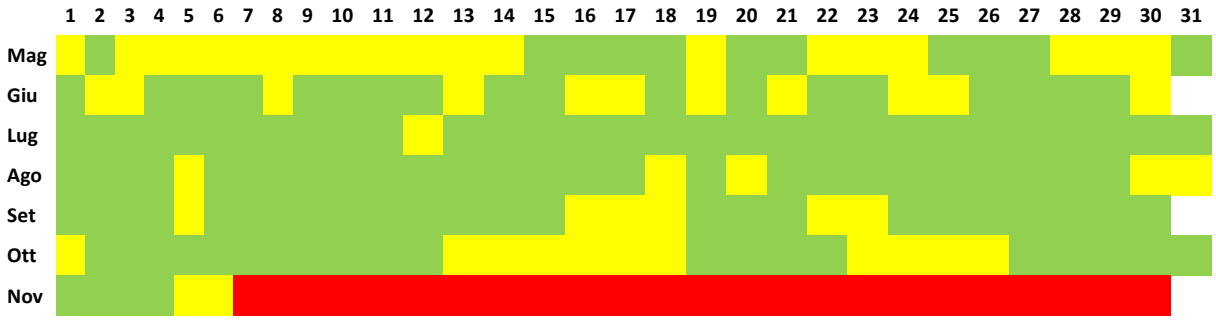
Figura 1. La postazione di monitoraggio sita sulla cresta del Mon de La Saxe con il ghiacciaio di Planpincieux sullo sfondo. Nel riquadro blu è compresa l'area ripresa dal modulo A1; nel riquadro arancione l'area ripresa dal modulo A2.

2.1. DATI ACQUISITI

Grazie alle modifiche tecniche apportate nella primavera 2015, la stazione di monitoraggio si è rivelata più robusta ed è tornata attiva dopo la stagione invernale senza bisogno di interventi straordinari.

Nel corso del 2016, da maggio a novembre, sono state acquisite un gran numero di immagini. Nella Tabella 1 si riporta l'anagrafica dei dati raccolti.

Tabella 1. Anagrafica dei dati acquisiti nel 2016 dalla stazione di Mont de La Saxe. Nei mesi gennaio - aprile il sistema è stato in ibernazione a causa della copertura nevosa; in giallo i giorni con dati raccolti in condizioni di scarsa visibilità; in verde i giorni con buona visibilità. In rosso i giorni senza acquisizione per ibernazione del sistema.



Come già descritto nei report precedenti, l'intervento del 2015 ha inoltre permesso di inserire una nuova fotocamera in grado di acquisire tutta la parete frontale del ghiacciaio: con modulo A1 si intenderanno le immagini che riprendono la lingua glaciale occidentale (il settore destro del ghiacciaio che è anche il settore più attivo); il modulo A2 acquisisce immagini dell'intero ghiacciaio (Figura 1 e Figura 2)

In base ai dati acquisiti, è possibile affermare che il modulo A1 sia in grado di raccogliere un numero maggiore di immagini con buona visibilità in quanto le ridotte dimensioni dell'area monitorata rendono più probabile che l'area indagata si trovi completamente sgombra da nubi o foschia.

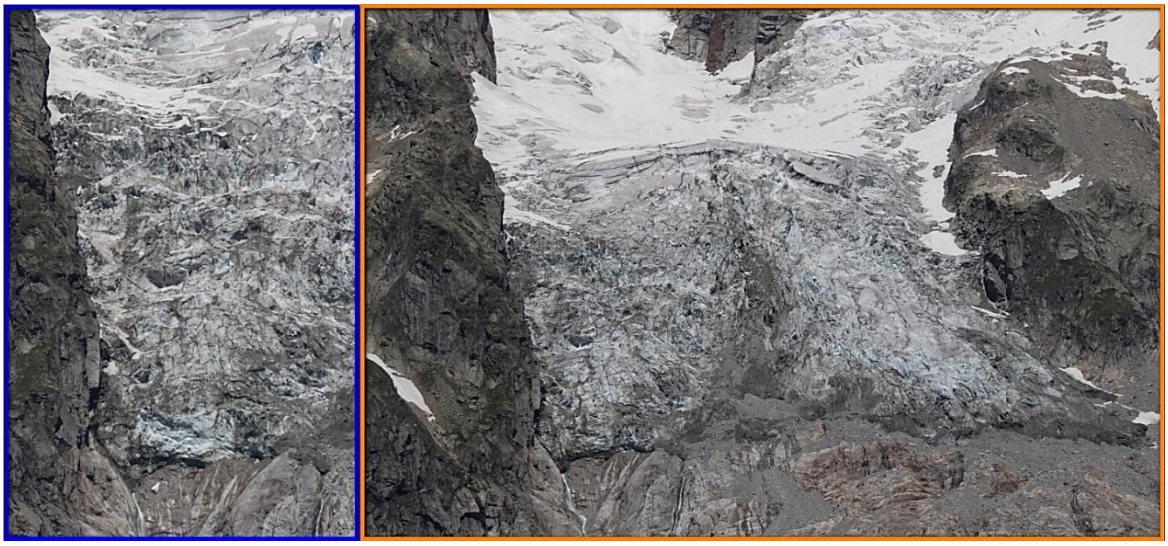


Figura 2. A sinistra, riquadro blu, esempio di immagine acquisita dal modulo A1. A destra, riquadro arancione, immagine acquisita dal modulo A2.

Una volta acquisite, le immagini vengono trasferite a Torino e analizzate; la prima fase di elaborazione prevede la selezione delle immagini che avviene in base a due criteri:

1. Conteggio automatico dei colori tramite software;
2. Selezione manuale delle immagini con buona visibilità intorno alle ore 13:00.

Una volta selezionate, le immagini vengono trattate utilizzando l'ultima versione del software di processing messo a punto e qui di seguito descritto.

2.2. PIXEL OFFSET

In questo studio è stata adottata una tecnica di cross-correlazione spaziale tra immagini acquisite in due istanti successive per la valutazione delle deformazioni della superficie glaciale.

Nonostante tale metodologia sia conosciuta dai primi anni '90 e sia applicata in vari ambiti e con varie tipologie di dato (ad esempio, segnali di ampiezza radiometrici, dati ottici), in letteratura esistono pochi esempi di applicazioni con approccio simile a quello messo in atto nel caso presentato, che presuppongono l'uso di una stazione a terra (non da satellite o aereo), per la valutazione delle deformazioni superficiali in ambito glaciale. In particolare risulta innovativa la durata totale della campagna e il numero di acquisizioni fotografiche, la distanza del fenomeno monitorato e la velocità osservata di deformazione, che rende più difficoltosa l'elaborazione del dato.

Il software adottato per il presente studio è scritto in Matlab® ed è presente in due versioni: una di sviluppo (Pixel Offset, PO), costantemente aggiornata e modificata, ed una a interfaccia grafica (Pixel Offset-Graphical User Interface, POGUI) utilizzata per la stesura dei report quindicinali, più agile e comoda, ma con poche opzioni di controllo da parte dell'operatore. Entrambe le versioni trattano l'elaborazione del dato con la seguente procedura:

Co-registrazione: tutte le immagini acquisite vengono fatte sovrapporre esattamente ad un'immagine campione, usando come riferimento un'area ritenuta fissa che in questo caso è localizzata su una parete di roccia laterale. L'operazione si svolge calcolando i valori di cross-correlazione con lo stesso software PO, adattato all'uopo, che restituisce i valori di correzione per ottenere la sovrapposizione delle immagini.

Calcolo degli spostamenti: il software elabora iterativamente le immagini co-registrate calcolando gli spostamenti tra l'*i-esima* immagine, detta *master*, e la *i+1-esima*, detta *slave*. Lo spostamento tra le immagini è calcolato come il primo massimo della cross-correlazione spaziale 2D valutato per ciascun quadrante di $256 \text{ X } 256$ px. Dunque, la deformazione in questa fase è espressa in pixel e non ha ancora una valenza metrica. Si ottengono dei valori di spostamento nelle due direzioni, orizzontale e verticale. Convenzionalmente, l'asse y è considerato crescente dall'alto verso il basso, mentre l'asse x da sinistra verso destra nell'immagine.

Calcolo della coerenza: per ciascun settore e per ogni coppia di immagini viene valutata la *coerenza, γ,* una proprietà statistica che indica il grado di affidabilità del risultato di spostamento ottenuto. Il valore della coerenza è compreso tra 0 (affidabilità nulla) e 1 (affidabilità certa), nel nostro studio si è usata una soglia convenzionale per accettare il risultato, $\gamma \geq 0.75$. Quando la condizione non è soddisfatta il risultato è scartato.

Risultati: l'output di PO sono delle mappe di deformazione espresse in pixel per ciascun quadrante. Vengono forniti sia i dati di deformazione giornaliera che cumulata sul periodo in esame. Inoltre, PO produce dei risultati numerici che fungono da input per il software di visualizzazione EAPOE (Sezione 2.4).

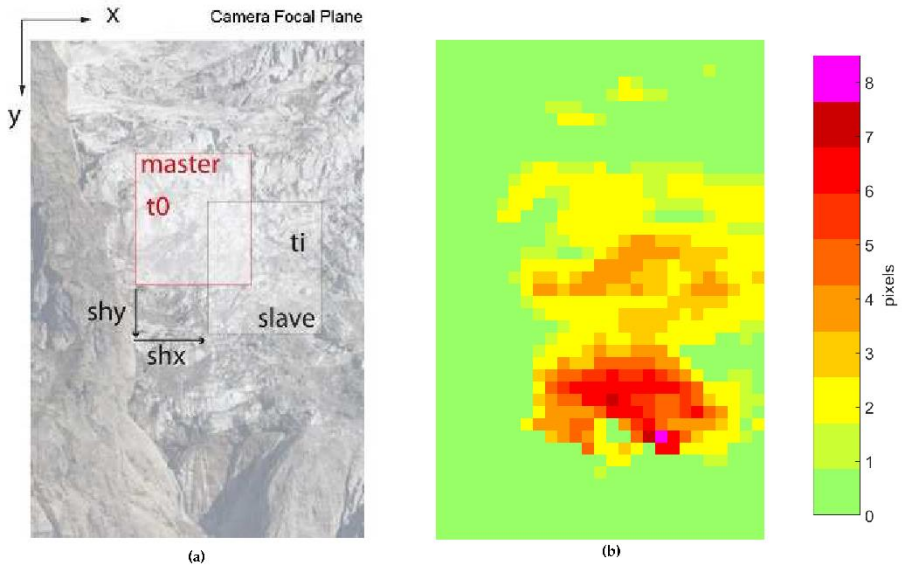


Figura 3. (a) Rappresentazione dell'algoritmo iterativo di Pixel Offset: un quadrante dell'immagine Master viene confrontato con lo stesso quadrante della Slave e vengono calcolati gli spostamenti. La procedura è applicata a tutti i quadranti. (b) Esempio di output di PO con la mappa di deformazione verticale in pixel.

2.2.1 STIMA DELL'ERRORE

Uno studio è stato svolto allo scopo di valutare la precisione di Pixel Offset per la stima di deformazioni superficiali. Per fare questo, sono stati analizzati i residui in seguito alla fase di co-registrazione delle immagini. Lo studio si è svolto sulle immagini del modulo A1.

Considerando il settore usato per la co-registrazione, sono stati individuati altri due settori dalle stesse dimensioni, entrambi posizionati sul crestone roccioso sulla sinistra dell'immagine, uno nella porzione superiore, uno in quella inferiore, per analizzare possibili fenomeni di rotazione della macchina fotografica o errori sistematici. La roccia ripresa da tutti i settori è considerata immobile tra un'immagine e l'altra.

L'analisi si è svolta come segue: dopo aver co-registrato le immagini, viene svolta una stima di pixel offset sui due settori in roccia, sui quali è atteso un risultato nullo di spostamento. In Figura 4 viene mostrata la disposizione dei vari settori di co-registrazione e la distribuzione dei residui in seguito alla co-registrazione. La distribuzione in frequenza di tali residui è simmetrica, e ciò indica che non sussiste un movimento rotazionale. L'errore medio assoluto (MAE) è dell'ordine di circa $0.7 - 0.9$ px in entrambe le direzioni. Considerando gli elevati tassi di deformazione osservati sul ghiacciaio, la precisione dell'apparato tecnologico viene assunta di 1 px e i risultati vengono arrotondati all'intero più vicino.

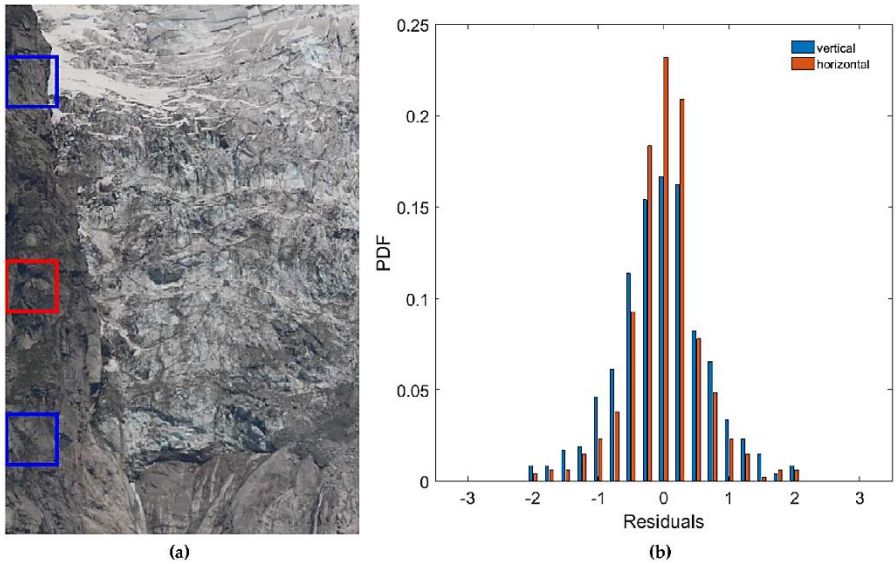


Figura 4. (a) Disposizione dei settori usati per la stima dell'errore. In rosso: settore usato per la co-registrazione; in blu: settori usati per la stima dei residui dopo la co-registrazione. (b) Distribuzioni dei residui per i movimenti verticali (blu) e orizzontali (rosso).

2.3. CONVERSIONE PIXEL-METRICA

La stima degli spostamenti del ghiacciaio con PO permette la valutazione di tali movimenti lungo le due dimensioni del piano perpendicolare alla LOS.

Per ottenere un valore metrico dello spostamento tra due immagini è possibile adottare alcune formule della teoria ottica, basate sulle caratteristiche geometriche del sistema e sulla proprietà della macchina fotografica.

Si consideri dunque un piano perpendicolare alla LOS a distanza D, la dimensione di un pixel, detta Ground Sampling Distance (GSD), si calcola come:

$$\alpha = \frac{\operatorname{atan}\left(\frac{S}{2f}\right)}{R} \quad (1)$$

$$GSD_p = 2 \cdot D \cdot \tan(\alpha) \quad (2)$$

Dove α è l'angolo di vista di un singolo pixel [gradi]; S è la dimensione del sensore [mm]; f è la lunghezza focale [mm]; R è la risoluzione della macchina fotografica e il pedice p indica perpendicolare alla LOS. In questo modo è possibile calcolare la GSD_p che è solitamente uguale nelle due dimensioni.

E' stata stimata la distanza tra la stazione di monitoraggio e l'area osservata dal modulo A1 che varia da 3700 e 3900 m. Per il modulo A1, a 3800 m di distanza la GSD_p è di circa 5 cm.

Per stimare il movimento "reale", una pratica molto diffusa in letteratura è quella di proiettare il dato di GSD_p sulla superficie osservata, in base all'angolo di incidenza σ della fotocamera sul piano:

$$GSD = \frac{GSD_p}{\cos \sigma} \tag{3}$$

Ciò equivale a considerare i movimenti osservati come le componenti di un vettore di deformazione esattamente parallelo alla superficie dell'oggetto considerato. Nel caso dei ghiacciai, è noto che essi possono essere soggetti a fenomeni di reptazione, o *creeping*, i quali causano un movimento non parallelo alla superficie, ma più inclinato.

Una rilevazione con laser scanner aereo del giugno 2014 ha fornito il Digital Surface Model (DSM) del ghiacciaio e degli immediati intorni. Grazie a questi dati è possibile stimare il GSD con l'equazione (3) sulla base della superficie del ghiacciaio a quell'epoca (Figura 5).

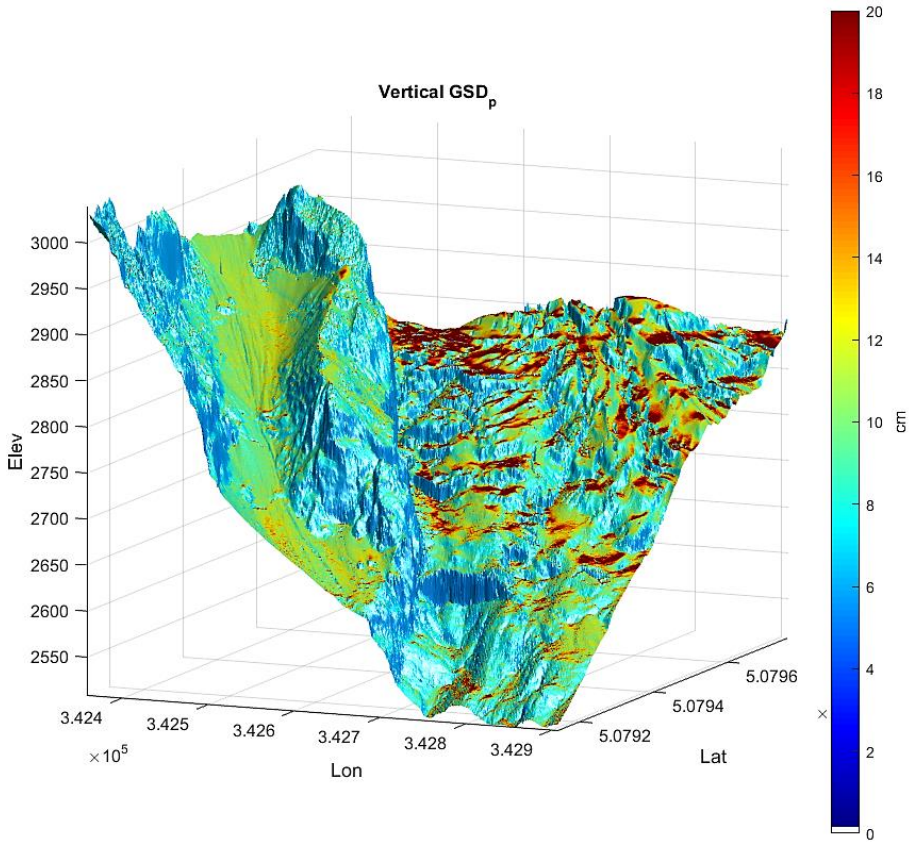


Figura 5. Esempio di GSD verticale stimata per una porzione del ghiacciaio e degli immediati intorni secondo il DSM aggiornato al giugno 2014.

Questo approccio presuppone tuttavia una conoscenza aggiornata e dettagliata della superficie in esame. Nel caso di un ghiacciaio così attivo come quello di Planpincieux, nel quale i ratei di deformazione sono così rapidi da indurre cambiamenti rilevanti a distanza di pochi mesi, tale assunzione non è garantita e l'utilizzo di DSM più vecchi di un anno può introdurre notevoli errori nella stima della GSD.

Un'altra possibilità, adottata nei casi in cui non si disponga di un DSM, è quella di proiettare la GSD_p lungo un piano inclinato con la pendenza media del ghiacciaio (32° in questo caso). Anche questo approccio introduce errori nella stima della GSD, ma è preferibile al precedente perché la sua semplicità permette di poter quantificare l'incertezza della misura.

2.3.1. ORTORETTIFICA

Nel corso del 2016 le attività del CNR IRPI si sono concentrate anche sulla definizione di un algoritmo di ortorettifica delle immagini acquisite dalla stazione di monitoraggio. L'ortorettifica è un processo mediante il quale si costituisce una trasformazione proiettiva allo scopo di correggere le deformazioni fotografiche, restituendo un'immagine a scala costante.

Grazie a questa operazione è possibile georiferire le immagini e proiettarle in tre dimensioni sul DSM (Figura 6). Inoltre, si rende possibile la stima della pendenza locale, della distanza relativa dalla fotocamera e di altri parametri utili per la conversione metrica dei dati di spostamento, oltre che l'eventuale accoppiamento con i dati di dispositivi diversi.

Nel prossimo futuro è prevista una nuova campagna laser scanner per l'elaborazione di un nuovo DSM, ciò permetterà una correzione di ortorettifica su superficie aggiornata e la proiezione 3D dei risultati.

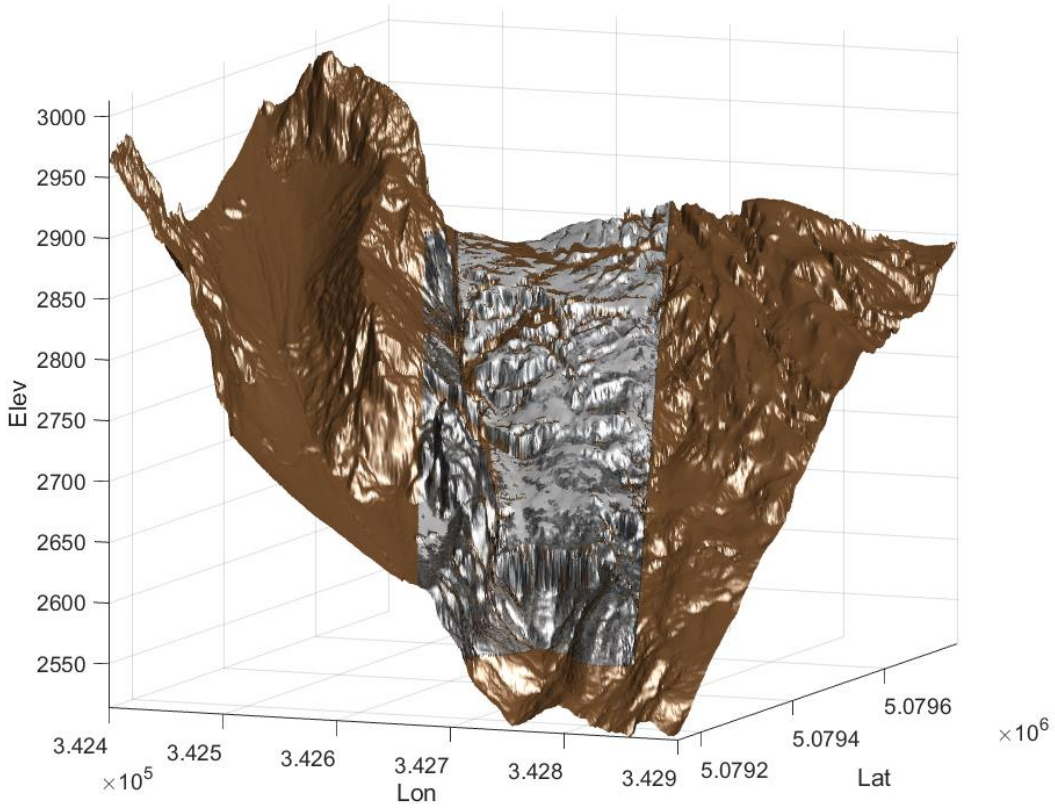


Figura 6. Immagine del modulo A1 ortorettificata e proiettata sul DSM del 2014.

2.4. EAPOE

Un punto cruciale nelle attività di monitoraggio in qualsiasi ambito è la fruibilità del dato a scopi di ricerca e di divulgazione. In quest'ottica, è stata realizzata una suite grafica per il software scientifico Matlab®, chiamata Effective Analysis for Pixel Offset Evaluation (EAPOE), che permette una visualizzazione dei risultati di deformazione ottenuti col software Pixel Offset.

Nello specifico, l'utente può selezionare il periodo di cui vuole visualizzare i risultati, i quali vengono presentati sotto forma di mappe di deformazione verticale cumulata e media giornaliera. Un'ulteriore mappa riporta la percentuale di dati raccolti oltre la soglia di coerenza per ciascun quadrante. L'utente

può selezionare un quadrante per osservare le relative serie storiche di deformazione cumulata e di velocità giornaliera. Infine, è possibile selezionare il dato del singolo giorno per visualizzare le immagini del giorno precedente, attuale e successivo, zoomate sullo specifico quadrante. In questo modo è possibile abbinare un'interpretazione visuale al dato numerico. La versione attuale tratta solamente le immagini del modulo A1 e prevede la conversione pixel-metrica su un piano inclinato con la pendenza media del ghiacciaio.

EAPOE è stato progettato per permettere agli utenti finali di analizzare in modo semplice e completo risultati qualitativi e quantitativi; l'obiettivo è quello di rendere operativo il tool mettendolo online in modo da permettere agli utenti registrati di osservare in tempo reale i dati del monitoraggio relativi alla deformazione superficiale del ghiacciaio di Planpincieux.

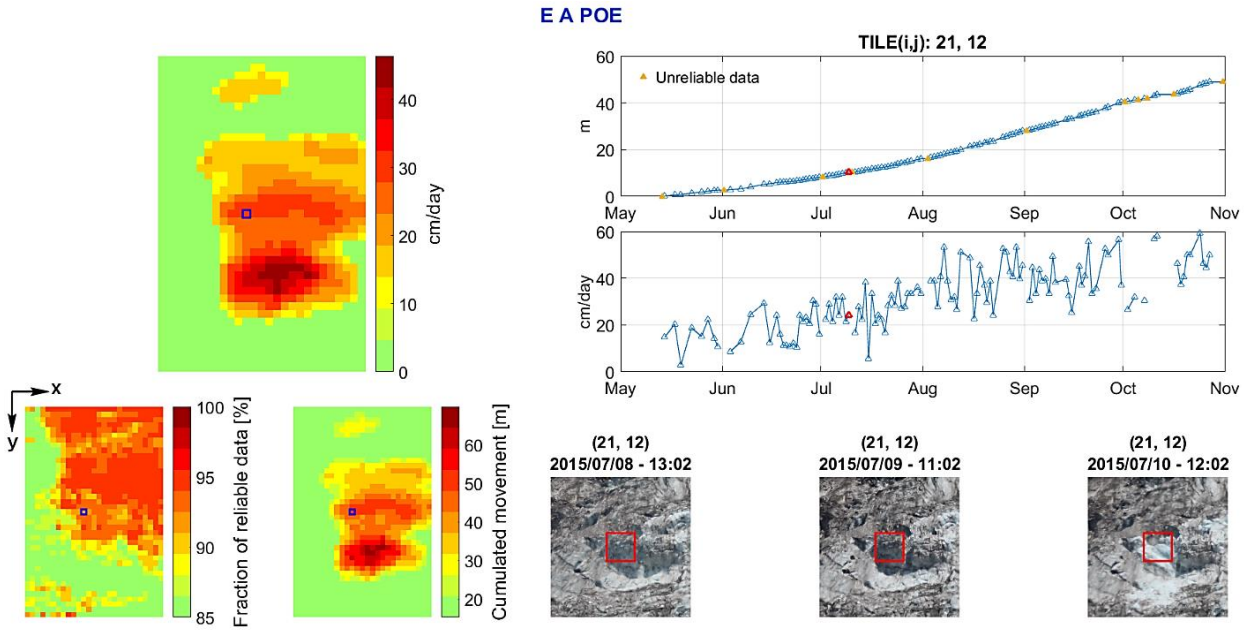


Figura 7. Esempio di output del tool EAPOE. I risultati di spostamento sono relativi al movimento verticale e sono proiettati su piano inclinato. Le serie storiche a destra si riferiscono al quadrante evidenziato in blu nella mappa di velocità, il quale è selezionabile dall'utente. Le foto zoomate in basso si riferiscono allo stesso quadrante e ai giorni prossimi a quello selezionato dall'utente nella serie storica ed evidenziato in rosso.

2.5. RISULTATI

In questa sezione vengono presentati i risultati ottenuti dal processing dei dati di monitoraggio ottico tramite tecnica di Pixel Offset per il periodo compreso tra il 15 maggio e il 30 settembre 2016.

In particolare si illustrano le velocità giornaliere di spostamento verticale ed orizzontale rilevate per i moduli A1 (Figura 8 e Figura 9) e A2 (Figura 10 e Figura 11). I dati sono riportati in pixel/giorno e gli assi sono orientati da sinistra a destra quello orizzontale e dall'alto verso il basso quello verticale.

Si fa notare che le dimensioni metriche dei pixel dei due moduli sono differenti (non è ancora stata stimato il GSD per il modulo A2, ma dovrebbe essere più che doppia rispetto al modulo A1) e tale differenza impedisce un confronto numerico in termini di pixel/giorno.

Il pattern di spostamento è invece confrontabile e risulta simile per entrambe le direzioni nei diversi moduli. La corrispondenza (al netto delle tolleranze) tra i risultati del modulo A1 e A2 evidenzia la bontà

del metodo di calcolo sviluppato.

L'analisi dei risultati evidenzia inoltre la grande velocità verticale osservata sul margine frontale inferiore della lingua glaciale occidentale, ripresa dal modulo A1 (lato sinistro nelle immagini del modulo A2). Tutta la parte bassa di questo settore è caratterizzata da una discreta velocità verticale verso il basso. La velocità orizzontale è invece assai ridotta, a causa della frontalità della ripresa delle immagini. Nella parte frontale si osserva tuttavia una velocità marcata verso il lato sinistro dell'immagine.

Analoghe considerazioni valgono per questo settore osservato dal modulo A2. Invece, nella parte orientale si possono individuare due flussi principali: i) il primo, proveniente dalle Grandes Jorasses, scende dall'alto a destra verso sinistra nella foto con una elevata velocità orizzontale e verticale; ii) il secondo si muove in direzione opposta, da sinistra verso destra, anche questo mostra elevata componente di velocità orizzontale.

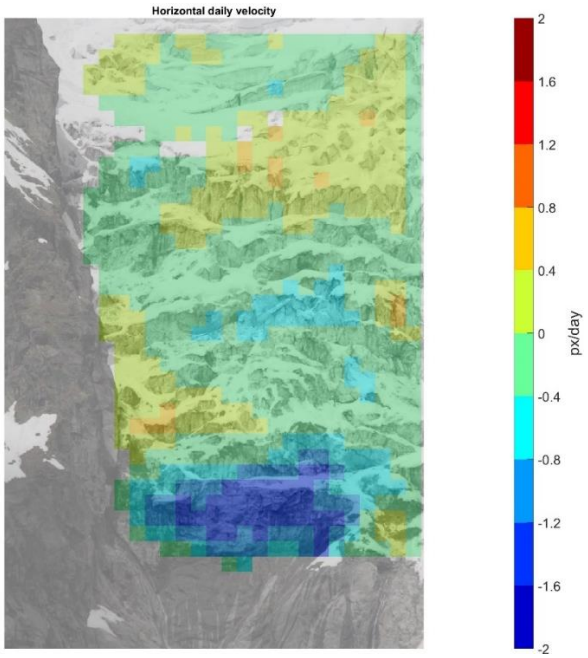


Figura 8. Velocità orizzontale media giornaliera per il modulo A1. In questo settore glaciale la componente orizzontale è molto bassa. Nella parte frontale invece, si osserva una velocità accentuata verso sinistra.

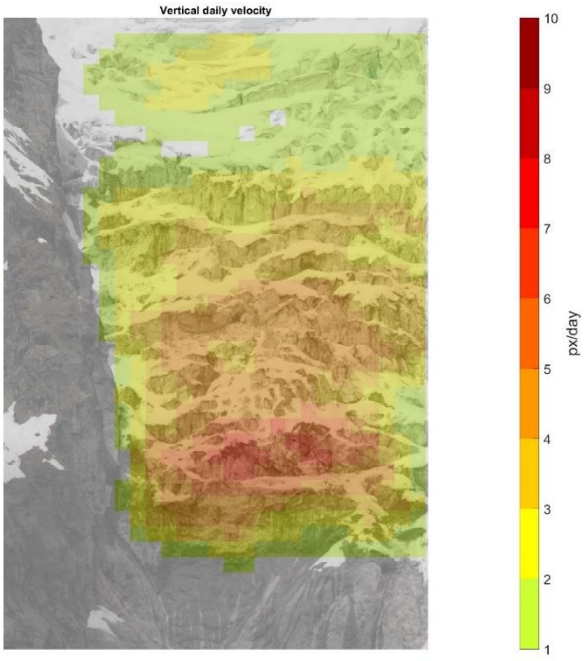


Figura 9. Velocità verticale media giornaliera per il modulo A1. Il picco di velocità si osserva nella parte bassa del ghiacciaio. La parte alta, con pendenza più lieve, è caratterizzata da velocità minore.

2.6. CAMPAGNE GB-SAR

Per completare il monitoraggio con tecnologia ottica effettuato dalla stazione del Mon de La Saxe, tra la fine del 2015 e la prima metà del 2016 sono state effettuate due campagne di misura con GB-SAR.

La prima campagna è stata condotta tra il 1 settembre 2015 e il 15 ottobre 2015 con uno strumento Ibis-S (IDS^{TM}) in grado di effettuare una misura ogni 16 minuti.

La durata di questa campagna è estremamente rilevante per questo tipo di strumentazione, la quale, di norma, per scopi scientifici viene impiegata per campagne di alcuni giorni. Anche l'oggetto della misurazione è abbastanza originale, in letteratura esistono pochi esempi di studi condotti con GB-SAR per lo studio di deformazione di ghiacciai alpini.

La seconda campagna è stata effettuata con un GB-SAR dell'azienda Metasensing^{TM} durante il

periodo compreso tra il 13 e il 20 giugno 2016. La caratteristica di questo strumento è il ridottissimo tempo occorrente per effettuare una singola misura, di soli 10 secondi. Ciò permette di limitare gli effetti di rumore atmosferico sul dato rilevato, a scapito della sensibilità dello strumento. Inoltre, sono stati raccolti i dati in diverse configurazioni di polarizzazione, per studiare gli effetti di questi settaggi sulla misura.

In entrambi i casi gli strumenti sono stati installati in località Planpincieux, nel grande piazzale vicino all'abitato.

I dati di entrambe le campagne non sono ancora stati elaborati in modo definitivo. Tuttavia le prime analisi hanno fornito buoni risultati e prospettive incoraggianti.

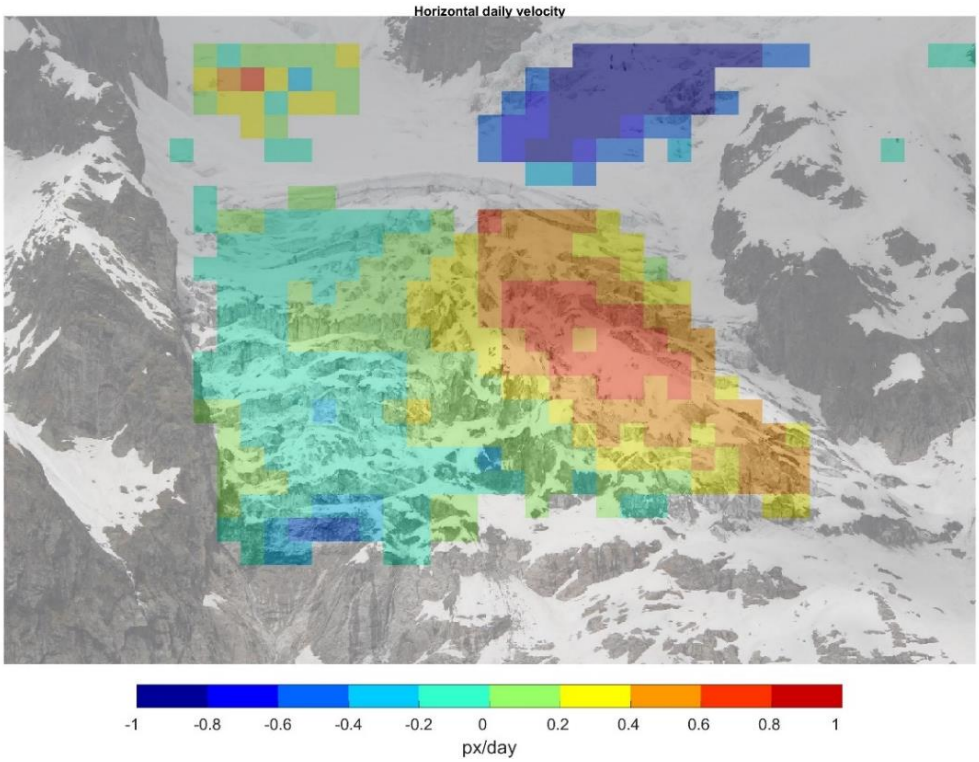


Figura 10. Velocità orizzontale media giornaliera per il modulo A2. La lingua glaciale sulla sinistra presenta una velocità orizzontale intorno allo zero. La lingua destra invece manifesta una velocità media verso destra nella parte bassa, mentre il settore in alto a destra ha una grande velocità verso sinistra. La parte in alto a sinistra presenta un po' di rumore.

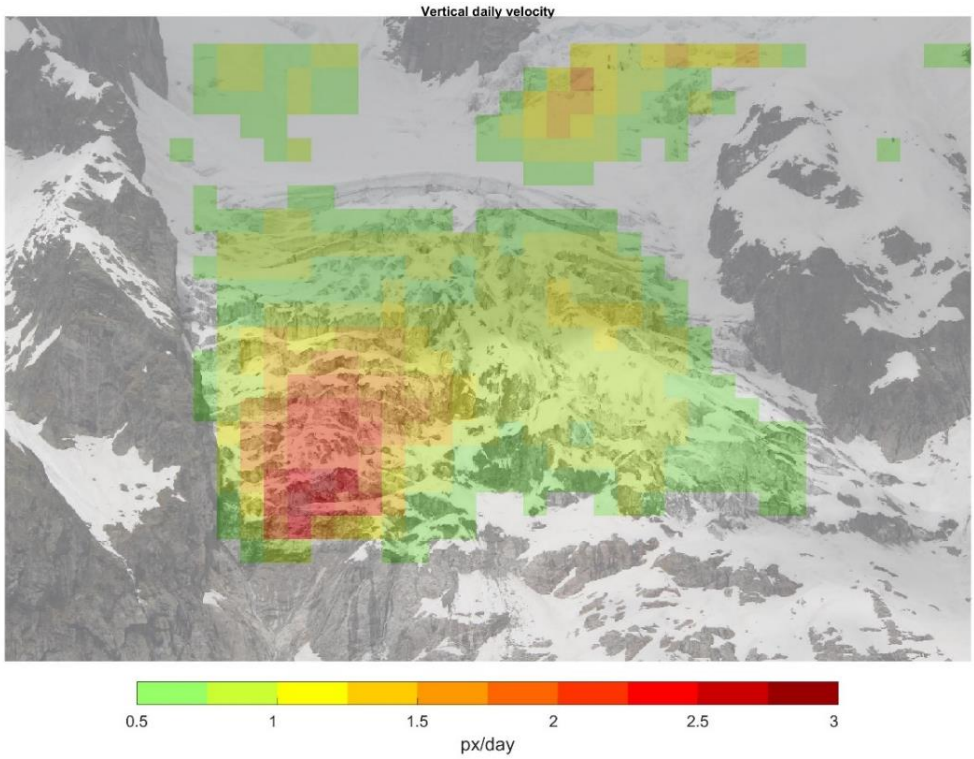


Figura 11. Velocità verticale media giornaliera per il modulo A2. Si nota la grande velocità nella parte frontale della lingua sinistra. Sulla destra il flusso inferiore presenta velocità più basse, mentre quello superiore è caratterizzato da valori leggermente più alti.

2.6.1 Campagna 2015

I dati raccolti durante la prima campagna GB-SAR sono stati elaborati nel corso del 2016 con tecnica interferometrica per valutare lo spostamento lungo LOS del ghiacciaio. Per il processing è stato usato un software scritto in collaborazione con il Centro di Tecnologia e Telecomunicazioni Catalano (CTTC), Spagna.

I risultati sono stati georiferiti e confrontati con i risultati ottenuti con metodo Pixel Offset. I due strumenti rilevano componenti diverse del movimento, ma i valori di spostamento verticale ottenuti con il Pixel Offset e quelli lungo LOS del GB-SAR sono stati proiettati lungo la superficie del ghiacciaio. Poiché le misure fornite dai due sistemi sono mappate su griglie con maglie di diverse dimensioni (approssimativamente 0.5x10 m per il GB-SAR; 18x6 m per il dispositivo ottico), è stata usata una pendenza media locale, valutata in prossimità dei principali seracchi, dove è disponibile il dato del GB-SAR. Sono state così individuati tre settori (Figura 12), di pendenza media stimata intorno ai 45°, sui quali è stato valutato lo spostamento medio osservato con i due strumenti (Tabella 2). Come si vede l'accordo è molto buono, i valori sono compresi negli intervalli di incertezza, che è stimata con la deviazione standard.

Tabella 2. Confronto tra le velocità medie proiettate lungo una pendenza media locale misurate con I due strumenti. L'errore è stimato con la deviazione standard.

Settore	GB-SAR (cm/gg)	Pixel Offset (cm/gg)
Front sector	28.2 ± 3.7	25.5 ± 10.3
Crevasses sector	22.6 ± 2.5	26.0 ± 4.4
Middle sector	20.1 ± 3.8	23.0 ± 6.4

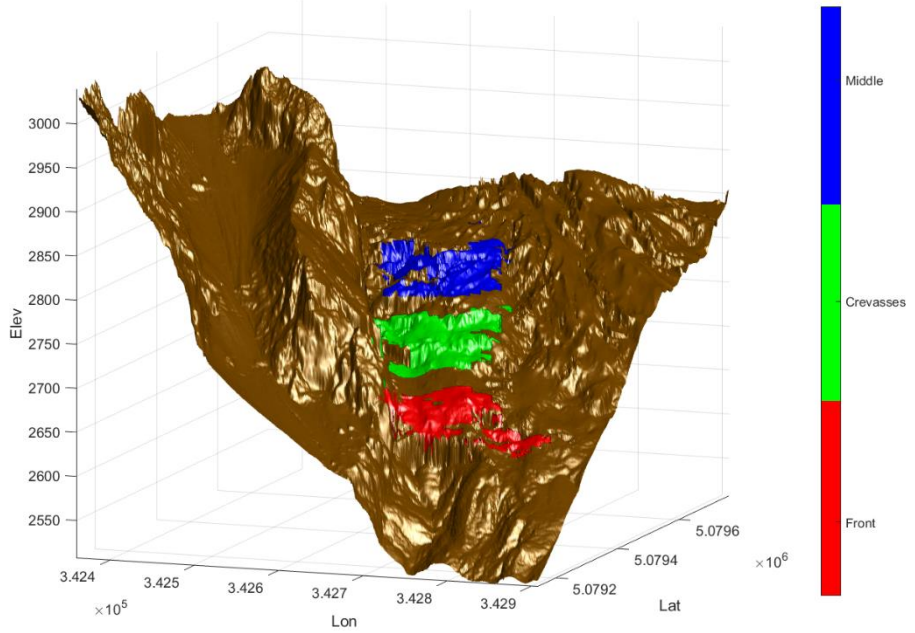


Figura 12. Rappresentazione dei settori individuati sul ghiacciaio. Vengono calcolate media e deviazione standard dei pixel di ciascun settore per il confronto tra i dati ottici e radar.

2.6.2 Campagna 2016

L'elaborazione dei dati della campagna 2016 è ancora nelle fasi iniziali. Si sono osservate le peculiarità dei dati raccolti con uno strumento di produzione relativamente recente; in particolare si è constatata la minor influenza del rumore atmosferico sui dati, particolarmente presente in siti ad alta quota come quello di Planpincieux, a fronte di una minor ampiezza del segnale, specialmente su superfici difficili da osservare come i ghiacciai.

Tuttavia, l'analisi della deformazione osservata su un insieme di punti selezionati sul fronte glaciale ha prodotto delle serie temporali di movimento con andamento lineare concordi tra loro, con velocità media giornaliera lungo LOS compresa tra i 20 cm/gg ed i 30 cm/gg.

Anche in questo caso sarà possibile un confronto con i dati ottici prodotti con Pixel Offset dopo aver georiferito i dati del radar.

2.7. CINEMATICA 3D

Uno degli obiettivi posti all'inizio del progetto era la realizzazione di un modello 3D della cinematica del ghiacciaio di Planpincieux. Il monitoraggio con la stazione ottica permette di raccogliere i dati di due componenti di deformazione superficiale. Dunque, accoppiando i risultati del Pixel Offset con quelli ottenuti con il GB-SAR è possibile la realizzazione del suddetto modello.

Come menzionato in precedenza, i risultati della campagna GB-SAR sono preliminari, tuttavia, il metodo per la realizzazione del modello 3D è stato prodotto in questi mesi e sarà possibile applicarlo ai risultati definitivi dell'analisi dei dati GB-SAR.

Vengono di seguito mostrati gli output di una simile procedura allo scopo di visualizzare e rendere chiara l'importanza che tali risultati comportano per la comprensione dei processi glaciali, anche a fini di

allerta preventiva (Figura 13, Figura 14, Figura 15 e Figura 16). In questa simulazione sono stati utilizzati i dati GB-SAR della campagna del 2015 e i dati ottici nello stesso periodo. I risultati vengono poi rappresentati proiettati sul DTM prodotto con la scansione laser effettuata nel 2014.

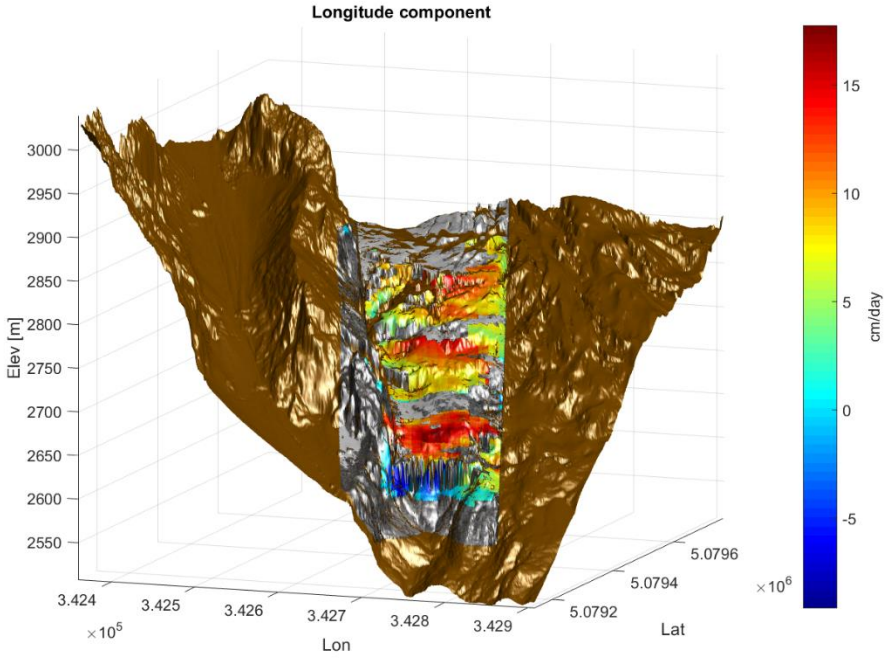


Figura 13. Componente orizzontale lungo la longitudine del campo di velocità del ghiacciaio. Il segno è positivo verso est.

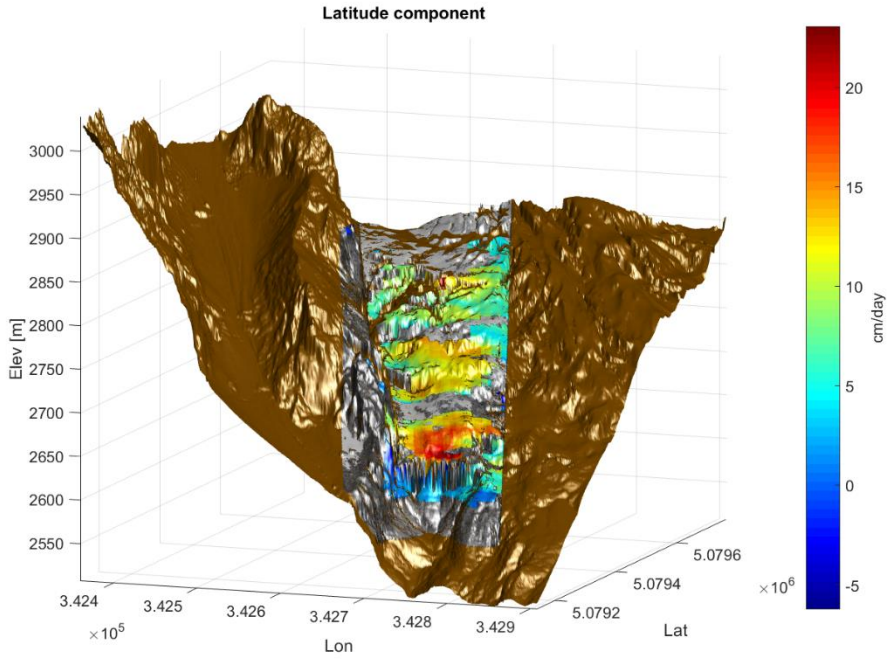


Figura 14. Componente orizzontale lungo la latitudine del campo di velocità del ghiacciaio. Il segno è positivo verso sud.

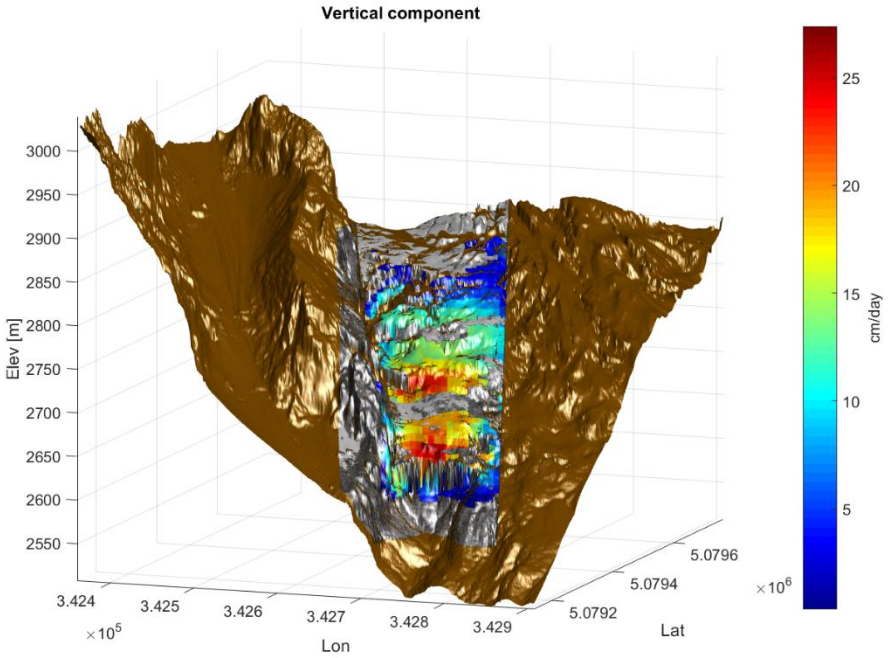


Figura 15. Componente verticale del campo di velocità del ghiacciaio. Il segno è positivo verso il basso.

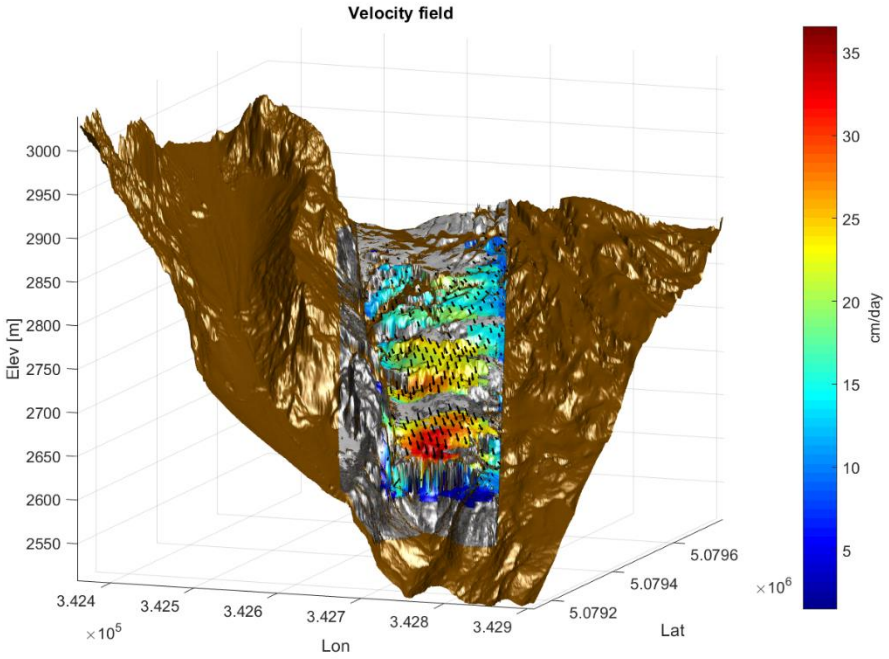


Figura 16. Campo del modulo di velocità del ghiacciaio. Le frecce indicano direzione e verso del vettore di velocità.

3 CONSIDERAZIONI FINALI

La stazione di monitoraggio ottico del ghiacciaio di Planpincieux installata al Mont de La Saxe è in funzione da oltre tre anni ed ha dimostrato di poter affrontare il rigido clima alpino. In particolare, le modifiche tecniche apportate nel 2015 le hanno permesso di superare l'inverno di quest'anno senza necessità di interventi straordinari. Il sistema software per l'elaborazione dei dati adotta tecnologie presenti in letteratura, ma le applica per monitorare processi complessi e molto rapidi, come le deformazioni superficiali di un ghiacciaio alpino, e a grande distanza (intorno ai 3800 metri). Tutto ciò rende il sistema di monitoraggio installato originale e di grande rilevanza scientifica. Infatti, nel mese di ottobre 2016 è stato pubblicato un articolo sulla rivista scientifica *Sensors* riguardo alla descrizione del presente sistema di monitoraggio e dei risultati ottenuti.

La validazione dei risultati attraverso confronto con strumentazione differente è importante per stabilire le performances del sistema hardware-software e si è riscontrato un buon accordo tra i risultati. Questo pone le basi per la realizzazione di un monitoraggio operativo in near-real time, automatizzando le procedure di analisi del dato e perfezionando ulteriormente alcuni aspetti critici come l'individuazione automatica dei crolli e degli spostamenti molto rapidi.

L'accoppiamento con i dati di altri strumenti, come il GB-SAR, permette la realizzazione di modelli cinematici 3D che sono estremamente utili per approfondire la comprensione dei processi glaciali. Qualora si riuscisse ad elaborare questo modello, per il quale si sono già poste solide basi, tale strategia rappresenterebbe il primo esempio di accoppiamento di dati ottici e GB-SAR.

Si aggiunge a tutto ciò la realizzazione in essere di un applicativo online in grado di fornire i risultati del monitoraggio, progettato a scopo divulgativo e scientifico per utenti anche non specialisti del settore.

Per concludere, si considerino il monitoraggio ottico tuttora attivo, le tre campagne radar effettuate negli anni con strumentazioni diverse e i rilievi LiDAR già effettuati e programmati sul ghiacciaio di Planpincieux e il monitoraggio del ghiacciaio sospeso delle Grandes Jorasses tramite stazione totale; tutto ciò rende il corpo glaciale delle Grandes Jorasses un vero e proprio laboratorio a cielo aperto unico al mondo per lo studio e lo sviluppo di tecniche di monitoraggio glaciologico da remoto. Inoltre, la collezione dei dati raccolti potrà essere estremamente utile per lo studio della cinematica e dinamica dei ghiacciai alpini.

Geohazard Monitoring Group

GEOHAZARD
MONITORING
GROUP

irpi

Geohazard Monitoring Group
Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica – IRPI
Consiglio Nazionale delle Ricerche – CNR
Strada delle Cacce, 73, 10135 Torino, Italy
Phone: +39-011-3977-811, fax: +39-011-3977-821
E-mail: geomonitoraggi@irpi.cnr.it
http://gmg.irpi.cnr.it