

# MONITORAGGIO DEI CAMPI DI VELOCITÀ SUPERFICIALI DEI GHIACCIAI TRAMITE I DATI SENTINEL-1 SAR: DEFINIZIONE DI UNA METODOLOGIA E IMPLEMENTAZIONE DEL SOFTWARE

## GLACIERS SURFACE VELOCITY FIELD MONITORING USING SENTINEL-1 SAR DATA: METHODOLOGY DEFINITION AND SOFTWARE IMPLEMENTATION

Marco Di Tullio <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Università di Roma "La Sapienza", Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale, DICEA, Area di Geodesia e Geomatica, via Eudossiana 18, 00184 Roma  
marco.ditullio@uniroma1.it

**PAROLE CHIAVE:** Sentinel-1, monitoraggio dei ghiacciai, Offset-tracking, velocità superficiale, Baltoro, San Rafael

**KEY WORDS:** Sentinel-1, glacier monitoring, Offset-tracking, surface velocity, Baltoro, San Rafael

### RIASSUNTO

I ghiacciai, oltre ad essere una risorsa preziosa per l'umanità, costituiscono uno dei principali indicatori dei cambiamenti climatici su scala locale e globale, essendo influenzati dalle variazioni di temperatura e dall'entità delle precipitazioni. Numerose osservazioni sui cambiamenti di massa, volume, area e lunghezza dei ghiacciai sono state raccolte dal World Glacier Monitoring Service in collaborazione con GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space), i cui dati rappresentano uno strumento fondamentale per migliorare la comprensione delle dinamiche e dei comportamenti di queste formazioni. Tra i numerosi parametri osservati, le velocità di scorrimento superficiale dei ghiacciai è uno dei più importanti, in quanto influenzate dagli eventi connessi a cambiamenti nella sua morfologia e struttura dei ghiacciai stessi. Lo scopo di questo lavoro è di presentare un software, sviluppato in ambiente Free and Open Source presso l'Area di Geodesia e Geomatica dell'Università di Roma "La Sapienza", basato su un'innovativa metodologia per il calcolo dei campi di velocità superficiale di scorrimento dei ghiacciai ottenuta dall'elaborazione di una serie di immagini in ampiezza SAR Sentinel-1A.

Diversi test sono stati eseguiti utilizzando immagini acquisite sulle aree della catena montuosa del Karakorum (Pakistan del nord) e sullo Hielo Patagonico Nord (Cile), conseguendo risultati coerenti con gli studi esistenti e mettendo in luce i diversi comportamenti fluidodinamici dei ghiacciai nonché le variazioni stagionali dei flussi. Per stimare gli spostamenti della superficie si è utilizzato il metodo dell'Intensity Offset-Tracking, basato sulla tecnica del template matching.

I risultati presentati in questo lavoro confermano l'affidabilità del metodo di Offset-Tracking nel determinare la velocità superficiale e la possibilità di avere un continuo aggiornamento dei campi di velocità attraverso l'impiego delle immagini gratuite Sentinel-1A, offrendo in prospettiva la possibilità dell'istituzione di un servizio sistematico globale finalizzato al monitoraggio dei ghiacciai.

### ABSTRACT

Glaciers are among the most reliable indicators of climate change at local and global scale and many studies on the glaciers dynamics have been carried out. Nowadays, the World Glacier Monitoring Service in collaboration with the Global Land Ice Measurements from Space, collects observations on time changes in mass, volume, area and length of glaciers. Among the parameters used for glacier monitoring, the glaciers surface velocity plays a crucial role, since it influences the events connected to glaciers changes. The aim of this work was to present a new Free and Open Source software developed at the Geodesy and Geomatic Division of the University of Roma Sapienza, based on a innovative methodology for glacier surface velocity fields computing, using Sentinel-1A SAR amplitude imagery. Several tests have been performed using Sentinel-1 imagery acquired over the Karakoram mountain (North Pakistan) and the Northern Patagonian Ice Field (Chile) in order to highlight the behaviour of different glaciers also the seasonal fluctuations. To estimate the glacier surface displacement, it has chosen to implement Intensity Offset-tracking technique, well tested and reliable method as testified by the numerous existing applications and based on template matching procedure obtaining results coherent with previous studies. The results presented in this work are coherent to those obtained in previous studies and confirm that SAR Off-set tracking is an effective method to obtain glacier surface velocity and highlight that it is possible to have a continuous update of the glacier surface velocity field through free Sentinel-1 imagery.

### 1. INTRODUZIONE

I ghiacciai sono considerati un importante indicatore dei cambiamenti climatici su scala globale, essendo influenzati dalle variazioni di temperatura e di precipitazione. Lo stato di salute dei corpi glaciali è anche un importante fattore per il ciclo idrogeologico locale. Nelle aree dove i ghiacciai si stanno ritirando infatti, si osservano anche forti variazioni dei regimi di deflusso e periodi di siccità sempre più rilevanti in tarda estate (Gotz, 2012). Il forte impatto che questi

cambiamenti possono avere sulla società richiede alla comunità scientifica un maggior sforzo per la comprensione della dinamica dei ghiacciai. Fondamentale a tal fine è lo sviluppo delle tecniche di monitoraggio. Molti studi sulla dinamica dei ghiacciai sono stati condotti fin dal 1894, grazie alla fondazione della International Geological Congress a Zurigo. Al giorno d'oggi, il World Glacier Monitoring Service (WGMS <http://www.wgms.ch>) colleziona osservazioni sui cambiamenti nel tempo in massa, volume,

area e lunghezza dei ghiacciai (glaciers fluctuations), così come informazioni statistiche sulla distribuzione del ghiaccio perenne.

Tra i parametri usati per il monitoraggio dei ghiacciai, la velocità di scorrimento superficiale riveste un ruolo cruciale, essendo connessa ai cambiamenti che riguardano i corpi glaciali.

In particolare il campo di velocità è:

- connesso al bilancio di massa del ghiacciaio, essendo utile per il calcolo del flusso che raggiunge l'area di ablazione (Heid, 2011) (Karpilo, 2009) (Pelto et al., 2008)
- un indicatore di stabilità, misurando il tasso al quale il ghiacciaio sta scorrendo (calving rates)
- (Heid, 2011) (Rolstad and Norland, 2009)
- importante per i fenomeni di erosione e di trasporto dei materiali (Heid, 2011) (Kääb, 2005)

La velocità superficiale dei ghiacciai può essere misurata sia attraverso sondaggi in situ, sia con tecniche di telerilevamento satellitare.

Anche se le tecniche in situ sono potenzialmente molto accurate, esse non permettono il monitoraggio con un'alta risoluzione spaziale e temporale essendo di difficile utilizzo in aree estese e poco accessibili come i ghiacciai; in più il rilievo GPS può essere molto costoso e non permettere l'acquisizione di un numero sufficiente di punti necessari per la comprensione della complessa dinamica del ghiacciaio (Karpilo, 2009).

Dall'altra parte immagini ottiche e radar (SAR) permettono il monitoraggio continuo di ampie fette della superficie terrestre, fornendo grandi moli di informazioni senza vincoli logistici.

In particolare i sensori SAR presentano diversi vantaggi rispetto a quelli ottici, uno fondamentale è la possibilità di acquisizione dell'immagine in qualsiasi condizione meteo e di illuminazione.

Fin' ora, due sono stati i principali approcci per la stima delle velocità di scorrimento superficiale attraverso l'utilizzo delle due tipologie di informazioni disponibili con i dati SAR:

l'interferometria, basata sulla fase (InSAR e DInSAR), e il metodo di Intensity Offset-tracking che sfrutta invece l'informazione in ampiezza del segnale ricevuto dal sensore SAR (Joughin et al., 2010).

Molti degli studi precedenti sono stati condotti tramite l'utilizzo del satellite ENVISAT. La missione è iniziata l'1 marzo 2002, ed è terminata l'8 aprile 2012, con orbite polari eliosincrone, ENVISAT montava sensori SAR operanti sulla banda C e in grado di collezionare immagini con un tempo di rivisitazione (revisiting time) pari a 35 giorni.

La tecnica InSAR ha permesso di mappare spostamenti dell'ordine del centimetro, offrendo importanti e interessanti risultati per il mondo della glaciologia (Erten et al., 2009) (Evans, 2000).

## **2. STIMA DELLA VELOCITÀ SUPERFICIALE DEI GHIACCIAI TRAMITE IMMAGINI SAR**

Diverse sono le tecniche usate per la stima del campo di velocità superficiale, come detto in precedenza le due principali sono l'interferometria SAR (InSAR e DInSAR) e il metodo di Intensity Offset-Tracking.

La prima consiste concettualmente nel calcolare la differenza di fase di ciascun pixel tra immagini acquisite in differenti epoche, sfruttando il nuovo passaggio sull'orbita dello stesso

satellite (repeat pass interferometry). Un'interferogramma risente sia di una componente legata all'elevazione del terreno, sia di una data dai movimenti della superficie del ghiacciaio nell'intervallo di tempo che intercorre tra le due acquisizioni (Joughin, 2010). Impiegando un DTM (Digital Terrain Model) dell'area monitorata è possibile rimuovere il contributo legato alla topografia, esplicitando in questo modo solo gli eventuali spostamenti della superficie.

Questo metodo ci permette di avere una grande accuratezza (dell'ordine del centimetro), ma i principali limiti sono rappresentati dalla mancanza di conservazione della coerenza tra le immagini, e dalla complessa procedura di phase unwrapping (letteralmente "srotolamento della fase").

È necessario sottolineare come raramente la coerenza tra immagini acquisite in tempi differenti si conservi nel caso di aree glaciali, in cui fenomeni di decorrelazione temporale causati da eventi quali precipitazioni intense o neve sono frequenti. Un'altra causa di decorrelazione può essere il movimento stesso, il quale produce rapidi e improvvisi spostamenti tra pixel vicini (Riveros, 2013), e cresce all'aumentare del periodo di tempo tra le acquisizioni delle immagini. A lungo, l'approccio interferometrico è stato sicuramente di successo, fornendo accuratezze superiori rispetto ai metodi basati sull'utilizzo dell'ampiezza del segnale del SAR limitato dalla risoluzione dell'immagine.

Dalla seconda metà dell'ultima decade, con la crescente disponibilità della nuova generazione di sensori SAR, come nel caso dei Sentinel-1, siamo in grado di sfruttare l'informazione in ampiezza grazie a immagini con maggiore risoluzione a terra.

Partendo da queste considerazioni è chiaro come lo sviluppo di differenti metodi risulta auspicabile. In questa direzione l'Offset-tracking rappresenta sempre più una seria alternativa per la determinazione degli spostamenti superficiali dei ghiacciai.

Questo metodo può risultare molto utile per andare a sopperire i limiti delle tecniche interferometriche nel caso di aree soggette a spostamenti grandi e incoerenti, causati da flussi molto rapidi, o intervalli di acquisizione estesi.

Il metodo di Intensity Offset-tracking si basa sul template matching, una tecnica per trovare porzioni in un'immagine che corrispondono ad un'immagine di riferimento.

Diversi metodi di confronto possono essere usati per valutare la somiglianza tra due immagini. Tra i più utilizzati vi è la NCC (Normalized Cross Correlation), la quale effettua la stima attraverso il calcolo dell'indice di correlazione come verrà spiegato in dettaglio nel capitolo 3. In accordo con il movimento atteso della superficie del ghiacciaio, possono essere scelte diverse dimensioni della finestra di cross-correlazione, ed è possibile valutare velocità con un errore al di sotto della dimensione del pixel dell'immagine nativa grazie al sovracampionamento in fase di processing.

I problemi principali nella correlazione delle immagini possono essere rappresentati dall'assenza di caratteristiche (features) comuni nella finestra di ricerca, dimensione delle finestre di ricerca e/o di riferimento troppo piccola rispetto alle features oppure cambiamenti eccessivi delle features stesse tra le differenti acquisizioni. L'Offset-tracking ha però il vantaggio di non necessitare di grande coerenza tra le immagini, e questo rappresenta il principale vantaggio rispetto ai metodi phase based.

### 3. METODOLOGIA

Con il presente lavoro si vuole presentare un nuovo software, sviluppato in ambiente Free and Open Source sviluppato presso l'Area di Geodesia e Geomatica del DICEA dell'Università di Roma "La Sapienza". Il software è in grado di valutare la velocità superficiale di scorrimento dei ghiacciai, attraverso l'elaborazione di immagini SAR Sentinel-1, creando una serie temporale di campi di velocità relativi al periodo considerato. L'elaborazione dei dati comprende tre fasi principali:

- definizione di un set di immagini SAR, sul quale eseguire le misure, scaricabili già coregistrate e ortorettificate dalla piattaforma Google Earth Engine;
- raffinamento della coregistrazione;
- individuazione del movimento e calcolo dei campi di velocità attraverso l'Intensity Offset-tracking;
- elaborazione dei grafici.

#### 3.1 Acquisizione delle immagini e raffinamento della coregistrazione

Le immagini SAR impiegate sono quelle rilevate in modalità di acquisizione IW (Interferometric Wide Swath Mode), come tutte le immagini rilevate sui continenti. Esse hanno quindi un'estensione di 250 km x 250 km, con formato GRD, in queste immagini quindi è andata persa l'informazione relativa alla fase. Molti test sono stati eseguiti, ed è chiaro come la scelta della distanza temporale migliore tra le immagini sarà in relazione alla velocità superficiale attesa per il singolo ghiacciaio e considerata la risoluzione a terra delle immagini Sentinel-1. Si è osservato come per ghiacciai "lenti" (10-20 metri/mese), quali il Baltoro, risulta poco significativo scendere sotto i 36 giorni (ossia tre volte il revisiting time), e invece per ghiacciai molto rapidi come il San Rafael sia necessario non superare i 36 giorni a causa della perdita di coerenza delle immagini.

Per questo lavoro sono state utilizzate le immagini già coregistrate e ortorettificate messe a disposizione dalla piattaforma Google Earth Engine.

La coregistrazione è un processo di sovrapposizione di due o più immagini acquisite con la stessa modalità, finalizzato ad eliminare eventuali traslazioni, rotazioni e variazioni di scala tra le immagini.

Una non corretta coregistrazione fra le immagini da processare può compromettere tutto il processo di analisi. Per minimizzare gli errori di coregistrazione in questa fase è stato necessario introdurre un affinamento della procedura. Le situazioni critiche sono state quelle riguardanti l'analisi di ghiacciai molto lenti (Exploradores, Baltoro, ecc.), molto più sensibili ai residui anche di pochi pixel nella coregistrazione. La Figura 1 mostra uno degli effetti di una coregistrazione non completamente corretta; si può vedere un'evidente traslazione che compromette la velocità ad ovest del ghiacciaio, con spostamenti non reali, incompatibili con la morfologia del terreno.

L'affinamento nella coregistrazione è stato effettuato utilizzando le aree intorno ai ghiacciai, che sono con elevata probabilità non coperte da neve. Quest'ultima infatti è la principale causa di errori nella coregistrazione. Partendo dallo shape-file del ghiacciaio, i contorni vengono ottenuti attraverso una convoluzione 2-D utilizzando uno specifico kernel, e lo spostamento viene calcolato tramite l'Offset-tracking passando per due fasi di sovracampionamento fino a un 1/8 di pixel (Figura 2). Infine le immagini slave vengono traslate tramite i valori mediani per ognuna delle due

dimensioni, andando a raffinare in questo modo la coregistrazione.

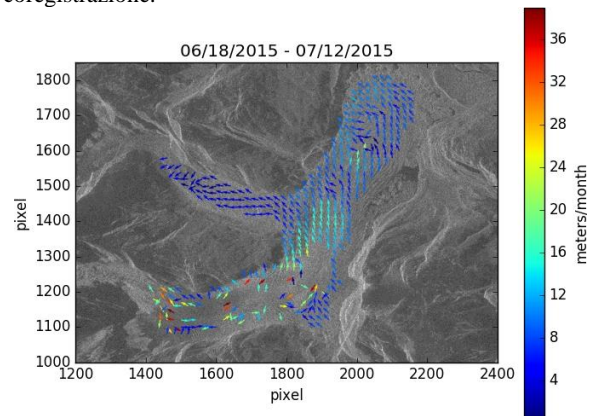


Figura 1. Velocità del ghiacciaio Exploradores ottenute prima del raffinamento

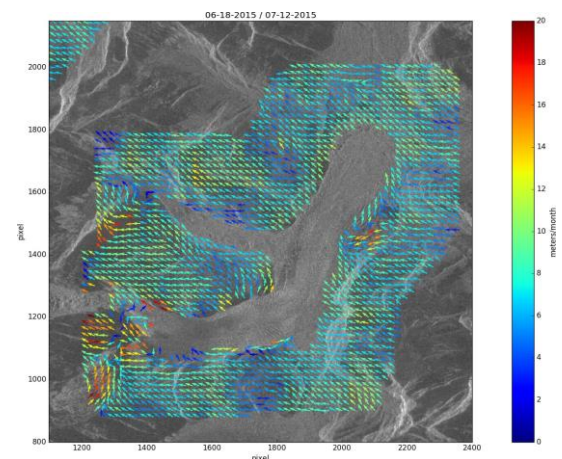


Figura 2. Spostamenti residui sul bordo prima del raffinamento

#### 3.2 Campionamento e individuazione del movimento con l'Intensity Offset-tracking

Il database mondiale GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space), tra le moltissime informazioni, fornisce i contorni dei ghiacciai nel formato standard shape-file, nel sistema di riferimento WGS84. Partendo dallo shape-file è stata campionata l'immagine con una griglia regolare ottenendo un set di punti in 2 dimensioni, la frequenza di campionamento, ovvero la distanza fra i punti, varia in base al ghiacciaio ed è stata anche questa definita a seguito di numerosi test effettuati al fine di ottenere risultati più accurati. Ognuno di questi punti è stato utilizzato come centro sul quale eseguire il template matching, in particolare è stato implementato l'algoritmo ottimizzato messo a disposizione da OpenCV (Open Source Computer Vision), e su cui si basa l'Intensity Offset-tracking (Fig. 3).

Diversi test sono stati eseguiti per individuare il criterio di somiglianza più adatto per il nostro caso, in particolare sono stati testati NCC (Normalized Cross Correlation) e SSD (Sum of Squared Difference) ottenendo performance computazionali migliori con il primo.

Per il calcolo dell'indice di correlazione bisogna per prima cosa stabilire l'estensione in pixel  $N \times N$  di un blocco di riferimento (block reference size) e  $M \times M$  di un blocco di ricerca (search reference size), con  $M$  maggiore di  $N$ . In seguito al campionamento si ottengono le coordinate dei

punti, ed ogni punto diventa il centro di un block reference size con estensione  $N \times N$ . Successivamente si crea una search reference size, con estensione  $M \times M$  sempre centrata sullo stesso pixel, ed in questa si muove il block reference size, centrandolo su diversi pixel. Si calcolano così i coefficienti  $\rho(x, y)$  di cross-correlazione sui vari pixel. La formula dell'indice di correlazione è la seguente:

$$\rho(x, y) = \left( \frac{\sum (f(x, y) - \bar{f}) \cdot (t(x - u, y - v) - \bar{t})}{\sqrt{\sum (f(x, y) - \bar{f})^2 \cdot \sum (t(x - u, y - v) - \bar{t})^2}} \right) \quad (1)$$

dove:

$f(x, y)$  e  $t(x - u, y - v)$  sono i valori di ampiezza nei pixel del block reference size nell'immagine 1 e nell'immagine 2;

$\bar{f}$  e  $\bar{t}$  sono rispettivamente la media dei valori di ampiezza nella block reference size dell'immagine master e dell'immagine slave;

$u$  e  $v$  sono i valori distanza orizzontale e verticale tra i pixel centrali del block reference size nelle due immagini.

Il pixel più somigliante è quello centrale del block reference che massimizza il valore dell'indice di correlazione.

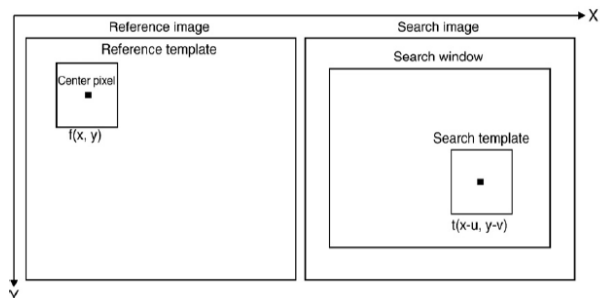


Figura 3. Intensity Offset-tracking

Il prodotto finale di quest'operazione è un file di testo in cui vengono tabulate le seguenti informazioni:

- coordinate  $x$  e  $y$  del pixel nell'immagine master;
- spostamento  $dx$  e  $dy$  tra del pixel nell'immagine slave rispetto a quello dell'immagine master;
- lunghezza del vettore;
- direzione del vettore;
- massimo coefficiente di correlazione ottenuto.

Infine considerando l'intervallo di tempo tra ogni immagine elaborata, sono state determinate le ground velocities.

## 4. RISULTATI

### 4.1 Area di studio

Al fine di testare l'affidabilità del software due importanti aree glaciali sono state considerate: la Hielo Patagonico Nord (HPN) (Fig. 4) in Sud America, e il Karakoram in Asia. Riportiamo di seguito i risultati dei ghiacciai San Rafael e Baltoro.

La HPN è la traccia della Patagonian Ice Sheet, un'estesa calotta di ghiaccio che copriva tutta Patagonia cilena e la parte più ad ovest della Patagonia argentina durante le glaciazioni del Quaternario.

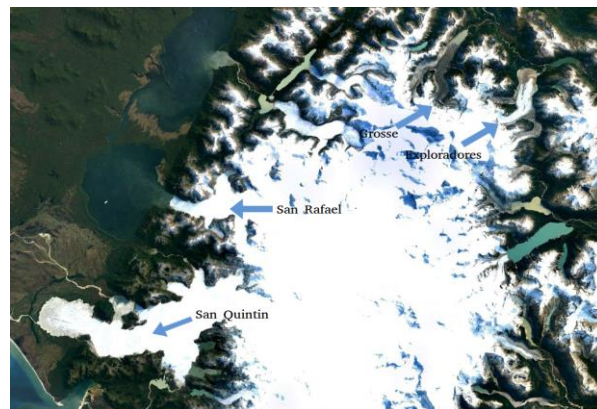


Figura 4. Hielo Patagonico Nord (HPN)

Oggi, con i suoi ghiacciai sempre più in contrazione è rimasta un'area di  $4200 \text{ km}^2$ , ed è ancora la seconda più grande massa continua di ghiaccio sulla terra escludendo le regioni polari. L'Ice Field conta 28 ghiacciai, con questo studio ci si è soffermati su 4 di questi (San Rafael, San Quintin, Exploradores, Grosse). Di seguito riportiamo i campi vettoriali del solo San Rafael.

Per quanto riguarda il Karakoram, questo è parte dell'area montuosa della Hindu-Kush-Karakoram-Himalaya, situato ai confini tra l'India, il Pakistan e la Cina, per un'estensione di  $500 \text{ km}$  da nord-ovest a sud-est.

- **San Rafael:** è l'unico ghiacciaio tidewater, situato alla più bassa latitudine al mondo della HPN, con un'area di  $600 \text{ km}^2$ , questo termina nella Laguna San Rafael, il ghiacciaio è parte della Laguna San Rafael National Park (Fig. 5).
- **Baltoro:** è il più grande ghiacciaio al mondo, situato in Pakistan, lungo  $63 \text{ km}$  con un'area di  $700 \text{ km}^2$ . Vicino al Baltoro vi sono il K2, il Gasherbrum e Masherbrum. Il ghiacciaio viene alimentato da altri corpi glaciali di più piccole dimensioni, tra cui i più importanti sono Godwin Austen glacier, Abruzzi glacier e Broad Peak glacier (Fig. 6).



Figura 5. Ghiacciaio San Rafael

Per implementare la cross-correlazione, sono state scelte una block reference di estensione  $95 \times 95$  pixel nel caso del San Rafael,  $55 \times 55$  pixel per il Baltoro, e una search reference funzione dallo spostamento atteso per la coppia di immagini considerate.





Figura 6. Ghiacciaio Baltoro

#### 4.2 San Rafael

Per ciascuna coppia di immagini dello stack sono state calcolate le velocità superficiali di scorrimento del ghiacciaio.

I grafici della Figura 7 mostrano velocità di circa 150 metri/mese nell'area più a monte del ghiacciaio, e velocità superiori (fino a 600 m/mese) nella parte terminale nella laguna, caratteristica proprio dei ghiacciai tidewater. Questi risultati sono in accordo con le misure fatte dalla NASA tramite lo Spaceborne Imaging Radar-C (SIR-C) nel 1994, e con le misure ottenute nel 2007 con l'Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reection (ASTER). Come testimoniano anche questi studi risulta complicato misurare le velocità sulla parte terminale con i sensori SAR a causa della perdita di coerenza del segnale (il flusso viaggia alla velocità di 1 km in 46 giorni), ma come possiamo vedere nelle immagini della Figura 7, grazie al ridotto revisiting time di Sentinel-1A (12 giorni) si riescono ad ottenere buoni risultati, che potranno essere migliorati con l'utilizzo dei dati del Sentinel-1B, che ridurrà il revisiting time arrivando a soli 6 giorni. È ben visibile dai campi di velocità ottenuti la differenza tra le aree al bordo del ghiacciaio, che risentono dell'attrito con le pareti, e il flusso centrale.

#### 4.3 Baltoro

I grafici della Figura 8 mostrano il naturale movimento del Baltoro: nella parte superiore le velocità sono in questo caso maggiori rispetto all'area terminale, dove il ghiacciaio è praticamente fermo.

Nell'area centrale sono state ottenute velocità intorno ai 160 metro/anno, nel periodo estivo (maggio-luglio). Alcuni problemi nell'individuazione del movimento sono visibili sui rami minori del ghiacciaio, tali aree infatti sono affette da distorsioni geometriche del SAR (layover e foreshortening).

Nel caso del Baltoro è evidente a occhio nudo le variazioni stagionali del flusso, basti confrontare la Figura 8(d) con la Figura 8(g), quest'ultima corrispondente al periodo invernale. Inoltre i risultati del nostro software sono stati confrontati con quelli ottenuti dall'Institute of Geodesy and Geophysics, dell'University of Chinese Academy of Sciences. Nel loro studio sono state usate 3 immagini ENVISAT ASAR acquisite durante il periodo 2004-2006, valutando la velocità superficiale con il metodo dell'Offset-tracking (Sun et al., 2014). I risultati da loro ottenuti mostrano velocità maggiori nell'area superiore (160 metri/anno), più basse al termine del ghiacciaio e sui bordi (10 metri/anno), in accordo con i nostri risultati, ma non sono stati in grado di evidenziare differenze stagionali dei campi di velocità.

## 5. CONCLUSIONI E PROSPETTIVE FUTURE

Lo scopo di questo lavoro è stato quello di presentare un nuovo software Free e Open Source sviluppato nell'area di Geodesia e Geomatica presso dell'Università di Roma "Sapienza", basato su una innovativa metodologia per il calcolo dei campi di velocità di scorrimento superficiale dei ghiacciai elaborando il contenuto in ampiezza delle immagini SAR Sentinel-1. Per testare il software sono state utilizzate 13 immagini per il ghiacciaio San Rafael e 10 immagini per il ghiacciaio Baltoro, già coregistrate e ortorettificate grazie alla piattaforma Google Earth Engine. I risultati ottenuti mettono in evidenza sia il diverso comportamento di questi due ghiacciai, sia le variazioni stagionali dei campi di velocità.

Molti studi in passato hanno cercato di determinare i campi di velocità attraverso metodi interferometrici, spinti dalla grande risoluzione a terra fornita dall'informazione di fase del SAR. Queste tecniche sono però fortemente sensibili alla conservazione della coerenza dell'immagine, che rappresenta il principale limite nell'impiego per il calcolo delle velocità della superficie dei ghiacciai.

Con la crescente disponibilità dell'ultima generazione di satelliti come i Sentinel-1, siamo in grado di sfruttare l'informazione in ampiezza con una maggiore risoluzione a terra.

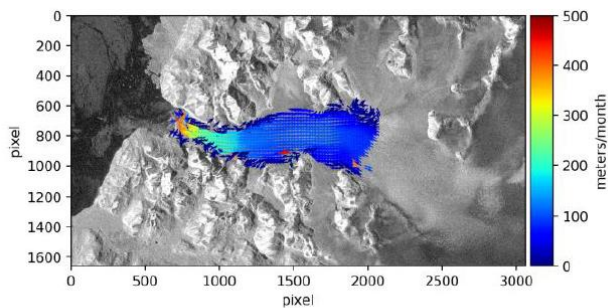
L'utilizzo delle immagini già coregistrate e ortorettificate della piattaforma Google Earth Engine e il raffinamento della coregistrazione ottenuto direttamente dentro il software, senza l'uso di altre applicazioni (come ESA Sentinel ToolBox), ha permesso il taglio netto dei tempi di processamento, e la semplificazione del processo di calcolo delle velocità, riducendo in tal modo gli errori possibili.

Due differenti ghiacciai sono stati analizzati, ottenendo in generale i risultati coerenti con studi precedenti: per quanto riguarda il San Rafael i campi di velocità vanno dai 150 metri/mese dell'area centrale ai 500 metri/mese dell'area terminale; per il Baltoro si sono ottenute velocità dell'ordine dei 100 metri/anno, e ben visibili variazioni stagionali.

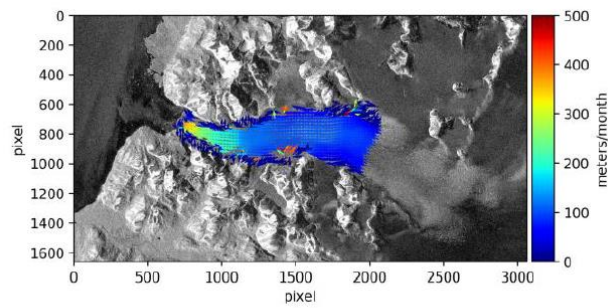
È sicuramente molto importante continuare a sviluppare il metodo di Offset-tracking, e in questa prospettiva le principali questioni da approfondire sono:

- il filtraggio degli outlier attraverso l'utilizzo del DSM (Digital Surface Model), per eliminare i valori di velocità non coerenti con la morfologia del terreno;
- la messa a punto di un modello funzionale e stocastico per la risoluzione ai minimi quadrati del problema, in modo da sfruttare la ridondanza di osservazioni disponibile grazie all'enorme quantità di dati Sentinel-1.

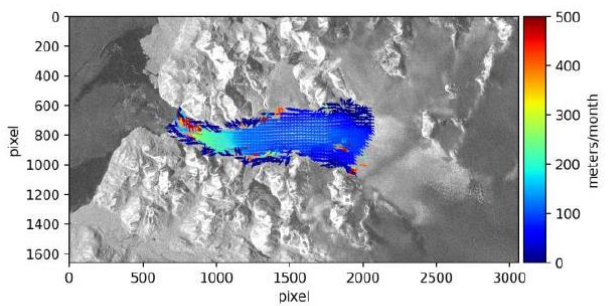
I risultati presentati con questo lavoro confermano che l'Offset-tracking è un metodo affidabile per monitorare nel tempo le velocità superficiali di scorrimento dei ghiacciai, che rappresentano un'informazione utile per investigare gli effetti stagionali sulla fluido-dinamica dei ghiacciai. Inoltre è importante sottolineare come ad oggi non esista un servizio di monitoraggio delle velocità a livello globale, ma la buona risoluzione spaziale (10 m) e temporale (6 giorni con Sentinel-1B) di questi satelliti e la possibilità di scaricare le immagini gratuitamente, rappresentano sicuramente la base per la sua realizzazione.



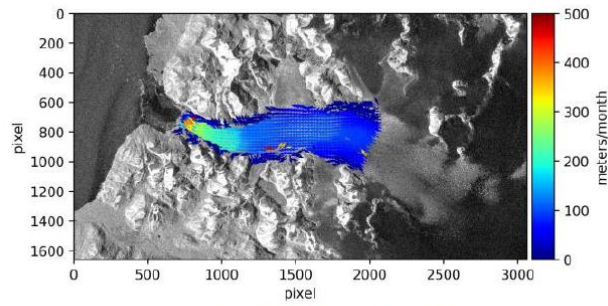
(a) 30 aprile 2016 -24 maggio 2016



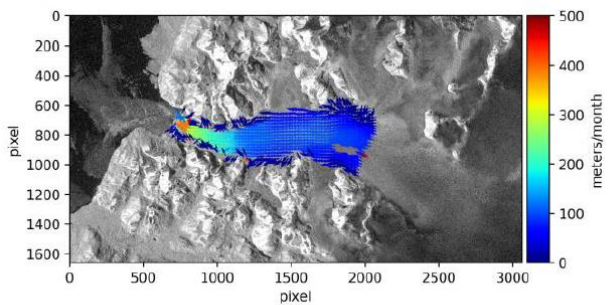
(e) 15 ottobre 2016 - 8 novembre 2016



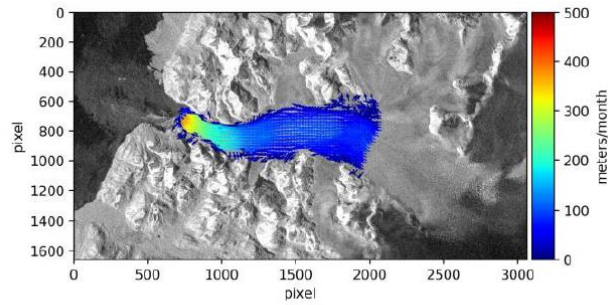
(b) 24 maggio 2016 - 11 luglio 2016



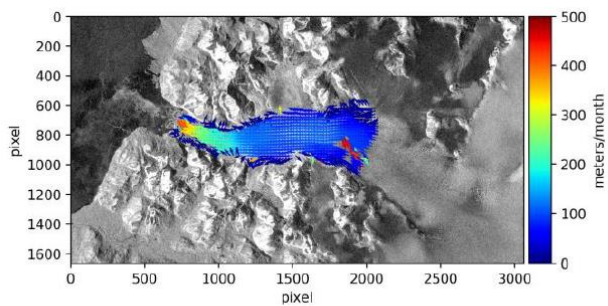
(f) 8 novembre 2016 - 2 dicembre 2016



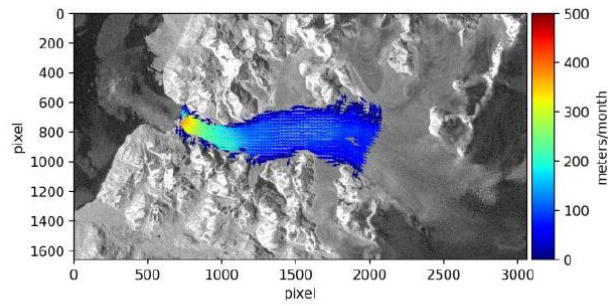
(c) 11 luglio 2016 - 4 agosto 2016



(g) 20 marzo 2017 - 1 aprile 2017



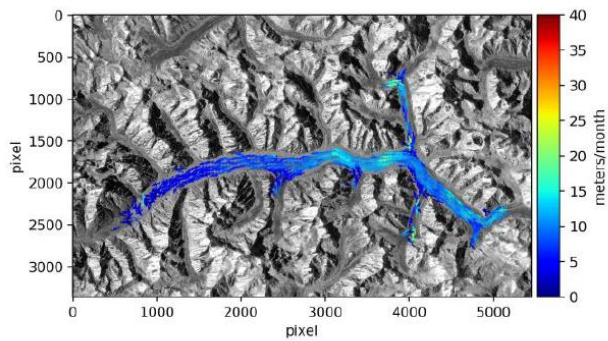
(d) 4 agosto 2016 - 28 agosto 2016



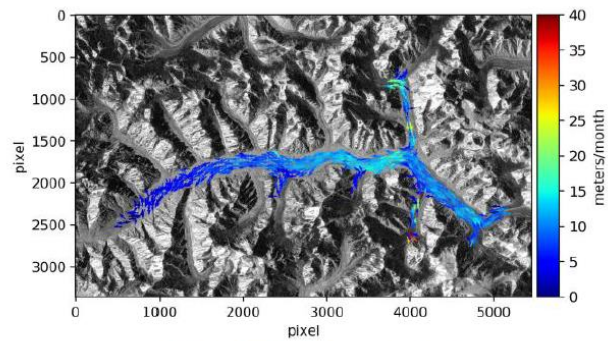
(h) 1 aprile 2017 - 13 aprile 2017

Figura 7. Serie temporale dei campi di velocità del ghiacciaio San Rafael.

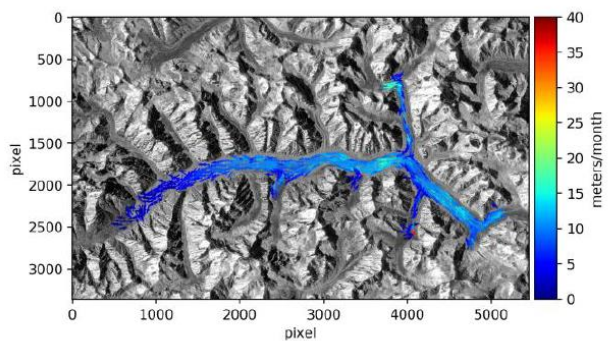




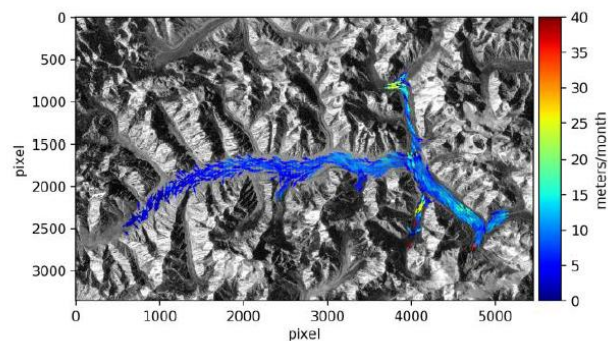
(a) 6 gennaio 2016 - 23 febbraio 2016



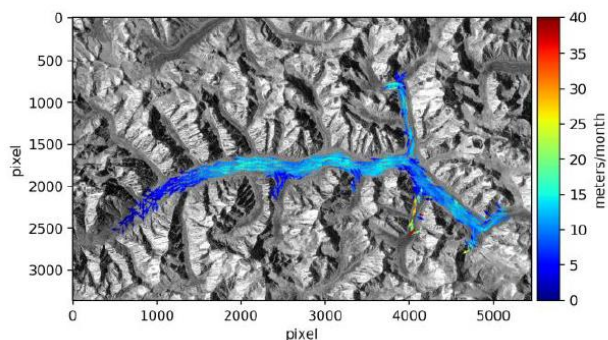
(e) 16 luglio 2016 - 2 settembre 2016



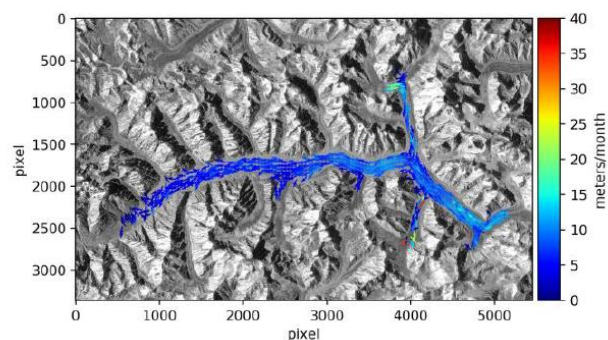
(b) 23 febbraio 2016 - 11 aprile 2016



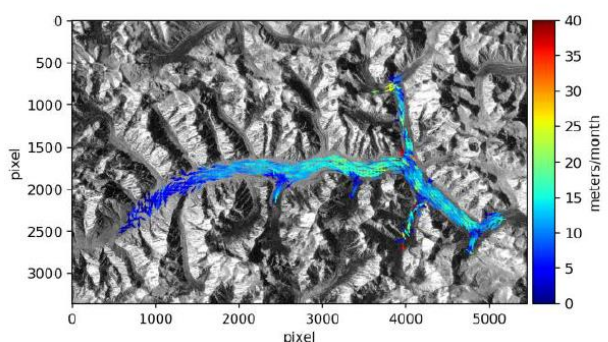
(f) 2 settembre 2016 - 20 ottobre 2016



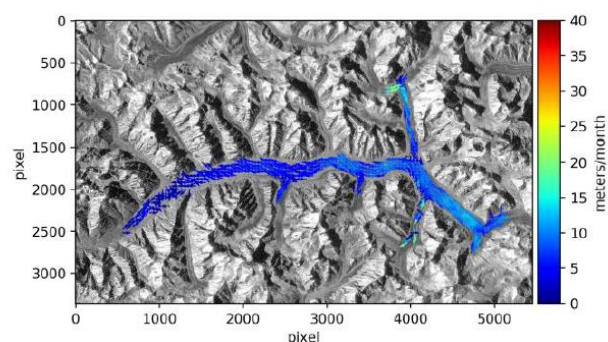
(c) 11 aprile 2016 - 29 maggio 2016



(g) 20 ottobre 2016 - 7 dicembre 2016



(d) 29 maggio 2016 - 16 luglio 2016



(h) 7 dicembre 2016 - 2 febbraio 2017

Figura 8. Serie temporale dei campi di velocità del ghiacciaio Baltoro.

## BIBLIOGRAFIA

- Erten, E., Reigber, A., Hellwich, O. and Prats, P., 2009. Glacier velocity monitoring by maximum likelihood texture tracking. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 47(2), pp. 394–405.
- IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 47(2), pp. 394–405.
- Evans, A. N., 2000. Glacier surface motion computation from digital image sequences. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 38(2), pp. 1064–1072.
- Gotz, A.; Burkhardt, A.; Marendaz, A.; Willi, H. Adaptation to climate change in Switzerland. Federal Office for the Environment (FOEN) 2012.
- GLIMS, 2012. Glims, and national snow and ice data center. 2005, updated 2012. GLIMS Glacier Database, Version 1. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center.
- Heid, T., 2011. Deriving glacier surface velocities from repeat optical images. PhD Thesis, University of Oslo.
- Joughin, I.; Smith, B.E.; Abdalati, W. Glaciological advances made with interferometric synthetic aperture radar. *Journal of Glaciology*, Volume 56, Number 200, December 2010, pp. 1026-1042(17) 2010.
- Karpilo, R., 2009. Glacier monitoring techniques. Geological Society of America.
- Pelto, M. S., Miller, M. M., Adema, G. W., Beedle, M. J., McGee, S. R., Sprenke, K. F. and Lang, M., 2008. The equilibrium flow and mass balance of the Taku glacier, Alaska 1950092006. *The Cryosphere* 2(2), pp. 147–157.
- Riveros, N.; Euillades, L.; Euillades, P.; Moreiras, S.; Balbarani, S. Offset tracking procedure applied to high resolution SAR data on Viedma Glacier, Patagonian Andes, Argentina. *Advances in Geosciences* 2013, 35, 7–13
- Rolstad, C. and Norland, R., 2009. Ground based interferometric radar for velocity and calving rate measurements of the tidewater glacier Kronebreen, Svalbard, from August 2007 and 2008. In: D. N. Arabelos and C. C. Tscharning (eds), *EGU General Assembly Conference Abstracts*, EGU General Assembly Conference Abstracts, Vol. 11, p. 2192.
- Scherler, D.; Leprince, S.; Strecker, A. Glacier surface velocities in alpine terrain from optical satellite imagery: Accuracy improvement and quality assessment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 2008
- Sun, Y., Jiang, L., Wang, H., Liu, L., Sun, Y. and Shen, Q., 2014. Detection and analysis of surface velocity over Baltoro glacier with Envisat ASAR data. In: *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 4030–4033.