



AUBAC

Autorità di bacino distrettuale
dell'Appennino Centrale

PAI DISTRETTUALE FRANE

ALLEGATO 1 **LINEE GUIDA PER L'UTILIZZO DEI** **DATI INTERFEROMETRICI SATELLITARI (PS-INSAR)**

UTILIZZO DEI DATI INTERFEROMETRICI SATELLITARI (PS-INSAR)

1.	Il monitoraggio delle frane per la Pianificazione di bacino	3
2.	Interferometria radar satellitare	4
3.	Interpretazione dei dati PSI a scala locale.....	6
3.1.	Serie temporali di deformazione	6
3.2.	Scomposizione vettoriale dello spostamento rilevato lungo la linea di vista (LOS)	7
3.3.	Heatmap e interpolazione del dato PS	8
3.4.	Sezioni interferometriche	9
3.5.	Valutazioni sullo stato di attività	10
4.	Disponibilità dei set di dati e relative linee guida	11

1. Il monitoraggio delle frane per la Pianificazione di bacino

Nell'ambito degli studi finalizzati all'aggiornamento del quadro conoscitivo rispetto ai fenomeni franosi riveste un ruolo centrale la corretta interpretazione dei dati di monitoraggio che permette di definire, nel dettaglio, le caratteristiche degli stessi e quindi individuare con maggiore accuratezza il grado di pericolosità. Rispetto al monitoraggio delle frane, al fine di introdurre il complesso argomento dell'utilizzo delle informazioni sullo spostamento da interferometria radar satellitare si ritiene opportuno richiamare un estratto significativo delle "Linee guida" approvate con Delibera del Consiglio SNPA 32/2021 (Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente istituito con legge 28 giugno 2016, n. 132) in riferimento al monitoraggio delle frane *in senso lato* con fine conoscitivo:

Il monitoraggio conoscitivo fornisce un valido supporto alla comprensione delle caratteristiche del fenomeno franoso, tra cui la geometria e i volumi coinvolti, i meccanismi di movimento, la pericolosità e la tendenza evolutiva.

Le principali finalità possono essere riepilogate come segue:

- *valutazione di tutti i parametri dimensionali ed evolutivi che concorrono a definire i modelli concettuali di un determinato tipo di fenomeno franoso;*
- *valutazione dell'evoluzione e dello stato di attività del fenomeno franoso, delle cause predisponenti e di innesco al fine di una corretta gestione del rischio;*
- *supporto alla scelta e dimensionamento di opere di stabilizzazione dei pendii naturali per la riduzione del rischio da frana, verifica delle scelte progettuali e controllo dell'efficacia degli interventi realizzati;*
- *supporto alla pianificazione territoriale (strumenti urbanistici) e alla predisposizione di piani di protezione civile;*
- *supporto alla progettazione di reti di monitoraggio con finalità di allertamento;*
- *integrazione e aggiornamento degli inventari dei fenomeni franosi delle pubbliche amministrazioni (costituzione di una serie storica di dati);*
- *studio e ricerca.*

Il monitoraggio conoscitivo si attua con l'impiego di strumentazioni appropriate e opportune modalità di misura da definire e precisare sulla base delle caratteristiche note dei movimenti franosi di interesse. Ogni sistema di misura ha prerogative e limiti propri; appare evidente che l'impiego di più tipologie strumentali sullo stesso sito possa garantire un controllo più efficace.

In via generale, si evidenziano alcuni elementi caratterizzanti il monitoraggio conoscitivo:

- *la rete di monitoraggio deve avere un soggetto gestore, responsabile dell'esecuzione delle misure,*
- *dell'analisi dei dati e della manutenzione della rete stessa;*
- *le tempistiche di esecuzione delle misure, validazione e comunicazione del dato nonché del ripristino a seguito di malfunzionamenti sono estremamente variabili (legate alla modalità e frequenza di acquisizione e alle finalità del monitoraggio) e non necessariamente immediate;*
- *viene fatto ricorso a strumentazione, sia di profondità che di superficie, a lettura manuale (SLM), in continuo (SLC) e/o con trasmissione da remoto (SLR);*
- *la strumentazione installata non è necessariamente rappresentativa dell'intero dissesto; ciò significa che può essere posta sotto controllo solo una porzione del fenomeno, compatibilmente con le conoscenze progressivamente acquisite, le finalità e il valore esposto considerati;*
- *la durata e la frequenza delle misure dipendono principalmente dalle caratteristiche cinematiche della frana e devono essere tali da consentire l'acquisizione di serie storiche rappresentative delle diverse misure condotte.*

Tra i vari sistemi e metodi di utilizzo degli apparati di monitoraggio, il presente allegato si concentra sulle tecniche di interpretazione dei dati interferometrici satellitari, strumento di grande utilità nell'uso pianificatorio ed applicativo da parte delle Regioni anche nell'ambito dei rapporti in corso con il Ministero dell'Ambiente.

2. Interferometria radar satellitare

La sempre maggiore diffusione dei prodotti derivanti dai programmi spaziali di Earth Observation (EO) consentono l'accesso, in alcuni casi gratuito, alle informazioni relative agli spostamenti dei riflettori posti al suolo misurati attraverso le tecniche interferometriche radar satellitari multi-temporali PSI (Persistent Scatterer Interferometry).

La PSI è una **tecnica consolidata** (tanto nella letteratura scientifica quanto nelle applicazioni pratiche) per lo **studio, la quantificazione ed il monitoraggio dei processi di deformazione superficiale**, ed impiega sensori montati su piattaforme satellitari. Tale metodologia sfrutta punti della superficie terrestre definiti "persistenti", poiché mantengono una elevata coerenza temporale di segnale durante le acquisizioni ripetute.

La presenza e la densità dei PS è solitamente bassa in aree vegetate, forestali e a bassa riflettività (ad esempio, superfici molto lisce), e in terreni con notevoli variazioni topografiche che possono oscurare il segnale radar. Inoltre, fattori quali la copertura nevosa o interventi antropici che alterano in modo significativo il territorio (lavori di costruzione, rifacimento di strade etc.), possono causare la perdita di coerenza temporale dei pixel, risultando in una inaffidabilità del dato di misura o nella perdita completa dei PS in quel punto.

Uno dei principali campi di impiego della metodologia PSI è la misura delle deformazioni superficiali del suolo, attraverso la rimozione delle componenti di spostamento misurate nella fase interferometrica che generano un disturbo (ad esempio la componente topografica, quella atmosferica, la componente di rumore etc.) grazie alla riduzione del rumore ottenuto attraverso la multi-temporalità del dato originale (i.e. *stack* di immagini radar).

Il dato interferometrico può essere interpretato attraverso l'utilizzo di sistemi di visualizzazione differenti riconducibili a due principali categorie:

- serie temporali di spostamento;
- mappe di deformazione del suolo, visualizzate come mappe di velocità di deformazione, stimate per l'intero *stack* di PS.

La possibilità di lavorare su ampie porzioni di territorio con una accuratezza teorica estremamente elevata, a costi relativamente ridotti, determina l'impiego della PSI in diverse applicazioni a varie scale di lavoro, che vanno dall'elaborazione su vasta area a livello nazionale, fino allo studio e monitoraggio di singole infrastrutture o fenomeni.

Tale tecnologia come evidenziato nelle Linee guida SNPA 32/2021, cui si rimanda per una panoramica relativa anche alle altre tecniche di monitoraggio, presenta dei punti di forza e dei limiti che sono di seguito richiamati:

I principali punti di forza delle tecniche radar satellitari interferometriche rispetto ai tradizionali sistemi di monitoraggio delle deformazioni in situ possono essere così riassunti:

- *vasta disponibilità di dati radar su molte aree, che permette pertanto di condurre delle analisi storiche (back analysis), ovvero delle indagini a ritroso nel passato, di fondamentale importanza per comprendere l'evoluzione di fenomeni di dissesto già avvenuti, consentendo di recuperare informazioni altrimenti non reperibili con le tradizionali tecniche di monitoraggio basate a terra;*
- *possibilità di ricostruire la componente verticale e orizzontale (sul piano E-O e verticale) delle deformazioni, quando si dispone di due geometrie di acquisizione e di una densità di PS sufficientemente elevata;*
- *possibilità di ottenere stime accurate della velocità di spostamento, con accuratezza millimetrica su una rete di misurazione molto densa, soprattutto in aree urbanizzate, senza la necessità di contatto diretto con la zona di indagine e senza dover installare strumentazione invasiva e/o apparecchiature a terra.*

È importante sottolineare anche le limitazioni delle tecniche radar satellitari multi-interferometriche, dovute alla fisica del segnale radar e al tipo di elaborazione. Di seguito vengono elencate le principali:

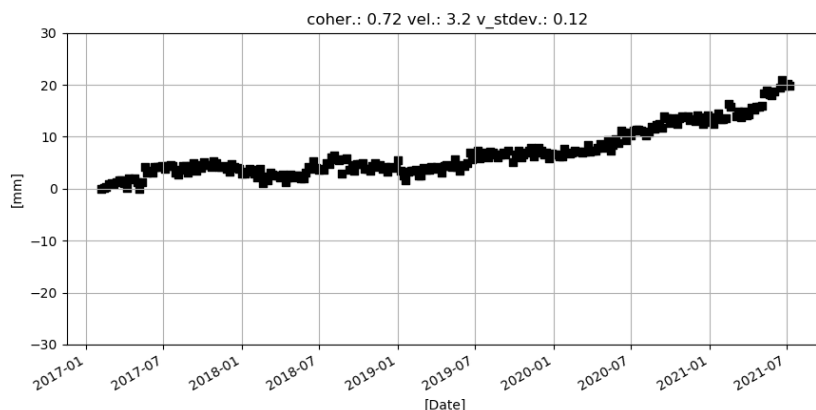
- *assenza o scarsità di misure in aree boscate, agricole, con copertura nevosa perenne o in aree umide: questa limitazione è dovuta al metodo con cui i punti PS vengono scelti. Infatti, il requisito necessario e imprescindibile per la definizione di un PS è che la superficie a cui esso si riferisce non cambi nel tempo;*
- *capacità di rilevare deformazioni lungo la direzione della LOS ("Line of Sight"): le misure di spostamento fornite dai dati PS sono perciò una componente di deformazione del vettore reale dello spostamento; a seconda dell'orientazione dei versanti, gli spostamenti potranno essere prossimi allo spostamento totale o solo una minima frazione degli stessi. Il valore di velocità rilevato sarà tanto più vicino a quello reale quanto più il movimento del bersaglio si sposta lungo la direzione coincidente con la LOS. Nel caso di moto ortogonale alla linea di vista del satellite lo spostamento misurato è nullo;*
- *mancanza di informazioni di spostamento in direzione N-S: data la geometria di acquisizione e la traiettoria orbitale dei satelliti è possibile apprezzare solo deformazioni verticali e allineate circa in direzione E-W;*
- *capacità di stimare deformazioni entro un determinato campo di velocità rilevabile: le tecniche radar satellitari multi-temporali interferometriche sono in grado di rilevare deformazioni all'interno di un preciso campo di velocità (velocità della componente lungo LOS);*
 - *limite superiore: una delle leggi base dell'interferometria definisce lo spostamento massimo misurabile tra due acquisizioni come pari a $\frac{1}{4}$ della lunghezza d'onda del segnale radar. Ad esempio, per il satellite Sentinel-1 questo limite è uguale a 1,4 cm tra due acquisizioni. La velocità massima misurabile è invece pari a 85 cm/anno; velocità maggiori possono essere comunque misurate, ma richiedono ulteriori elaborazioni e interpretazioni per risolvere i problemi legati all'ambiguità di fase;*
 - *limite inferiore: bersagli con velocità lungo LOS entro l'intervallo di sensibilità della tecnica interferometrica (e.g. ± 2 mm/anno, range variabile in base alla deviazione standard delle velocità della popolazione di bersagli radar).*

3. Interpretazione dei dati PSI a scala locale

In considerazione delle nozioni di base sopra richiamate, alcuni ulteriori elementi utili alla corretta interpretazione dei dati dei PSI sono stati individuati attraverso le attività svolte nell'ambito dell'«Accordo di collaborazione scientifica per la revisione degli areali a pericolosità da frana elevata (P3) e molto elevata (P4) delle aree PAI interferenti con le previsioni di ricostruzione nei comuni interessati dagli eventi sismici verificatisi a far data dal 24 agosto 2016» stipulato tra l'Autorità di Bacino distrettuale dell'Appennino centrale e il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Roma "Sapienza".

3.1. Serie temporali di deformazione

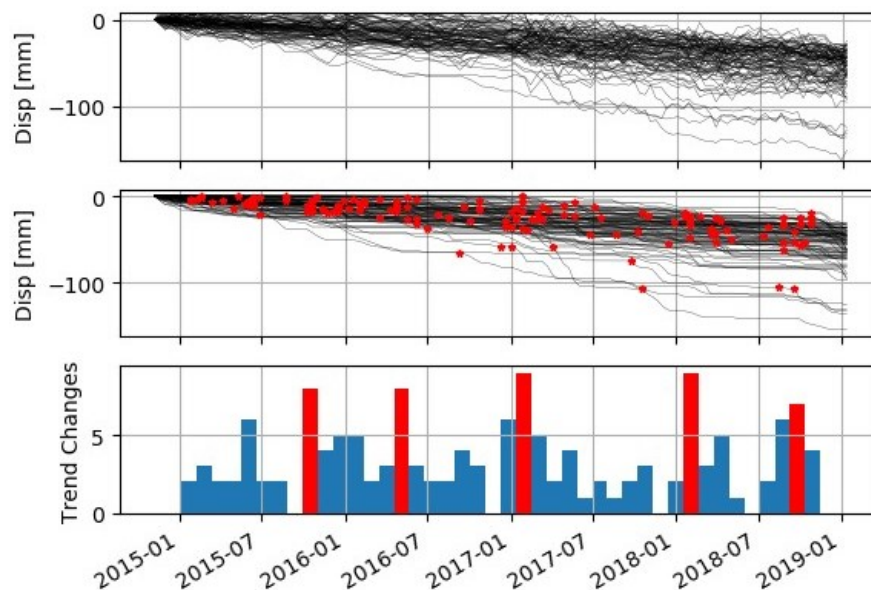
L'analisi delle serie temporali di spostamento permette di analizzare e comprendere meglio i pattern temporali e spaziali degli spostamenti e le caratteristiche dell'area investigata, al fine di evidenziare eventuali accelerazioni e/o movimenti anomali che potrebbero essersi verificati durante il periodo di monitoraggio. Da un punto di vista geologico, comportamenti non lineari all'interno della serie temporale possono verificarsi a causa della natura stessa del fenomeno di deformazione (ad esempio, i processi di subsidenza dovuti a compattazione del terreno mostrano generalmente con tendenza alla stabilizzazione) o ad accelerazioni repentine legati ad eventi di trigger (eventi sismici, piogge intense o prolungate etc.).



Serie temporale di spostamento relativa ad un PS nell'orbita ascendente o discendente.

Le serie temporali di spostamento dei PS possono essere utilizzate per valutare lo stile di attività della frana e ottenere informazioni sull'evoluzione temporale del processo, considerando la sua risposta a potenziali fattori innescanti e preparatori (ad esempio, eventi di precipitazioni intense, eventi sismici, scioglimento di nevi, variazioni di temperatura etc.). Attraverso una analisi di variazioni di *trend* di spostamento nella serie temporale è possibile quindi correlare accelerazioni nella deformazione misurata rispetto alla possibile causa scatenante. Affinché questo tipo di post-elaborazione sia affidabile, è necessario considerare un insieme di PS, che possono essere scelti come rappresentativi sia dell'intero processo investigato, che di una sua porzione significativa. In questo modo l'analisi identifica le effettive variazioni riscontrate nelle serie temporali di tutti i PS selezionati, rendendo il risultato statisticamente più rappresentativo dell'effettivo pattern temporale di deformazione del fenomeno investigato.

Nell'esempio di seguito riportato vengono mostrati tre grafici. Il primo mostra tutte le serie di spostamento interrogate nella selezione del cluster di PS. Il secondo visualizza le serie temporali disaggregate, con punti rossi che identificano una variazione di tendenza e quindi valori superiori ad una certa soglia di accelerazione. Nell'ultimo grafico viene visualizzato l'istogramma delle variazioni di *trend*, dove vengono evidenziate le barre che mostrano la concentrazione massima di variazioni nell'arco temporale investigato.



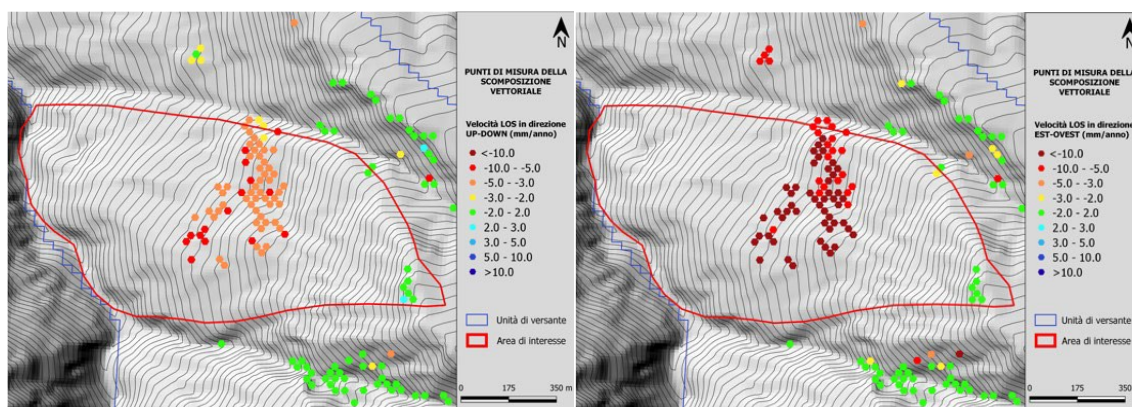
Risultato dell'analisi di variazione di tendenza dello spostamento registrato da un cluster selezionato di punti di misura.

Questa analisi può essere facilmente messa in relazione con dataset ausiliari (quali dati di pluviometria o eventi sismici) per andare a stimare una possibile correlazione tra accelerazioni nella tendenza deformativa del processo ed eventi innescanti esterni.

3.2. Scomposizione vettoriale dello spostamento rilevato lungo la linea di vista (LOS)

Questo tipo di analisi di post-elaborazione consente di scomporre la velocità del PS, acquisita secondo la linea di vista satellitare (denominata LOS - **Line of Sight**) nelle due componenti di spostamento lungo le direzioni orizzontale (est-ovest) e verticale (up-down). Questo strumento è essenziale nell'interpretazione del movimento preferenziale del processo deformativo in atto, consentendo di distinguere movimenti prevalentemente verticali (legati ad esempio a fenomeni di subsidenza o sollevamento del terreno) da movimenti prettamente orizzontali (verosimilmente legati a instabilità gravitative di versante). È inoltre possibile operare una analisi di dettaglio all'interno di uno stesso fenomeno deformativo, distinguendo per esempio zone di distacco (dove prevalgono spostamenti verticali) da zone di transito e accumulo del corpo di frana (con prevalenza di movimenti orizzontali). Per ottenere la scomposizione vettoriale è necessario disporre dei dataset in entrambe le geometrie orbitali e i rispettivi parametri orbitali (cioè, angoli di azimut e incidenza del segnale al suolo) come dati di input.

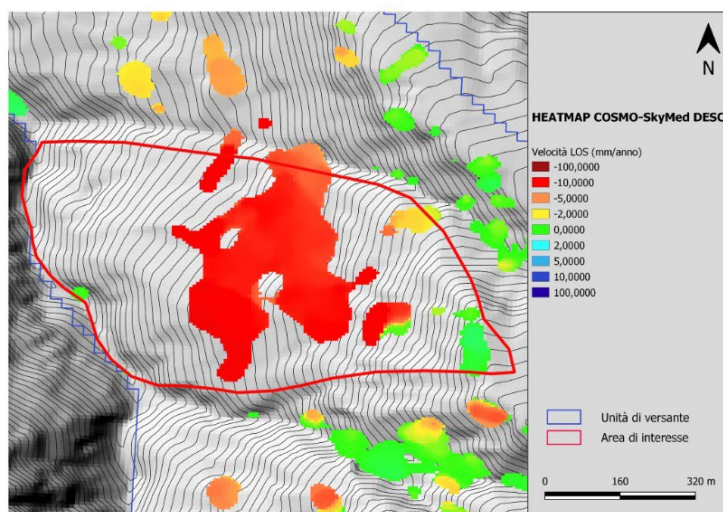
I PS vengono quindi uniti spazialmente in base alla distanza geometrica tra i vicini e campionati in punti sintetici distribuiti su una griglia regolare. Per definire la distanza sulla base della quale verrà impostata la griglia regolare di punti di misura sintetici è opportuno considerare la risoluzione a terra del sensore che si sta utilizzando, per evitare di incorporare il contributo di PS troppo distanti tra loro, che potrebbero dunque falsare il risultato finale di aggregazione del movimento. L'output finale della combinazione multi-look consiste in due layer separati di punti sintetici distribuiti regolarmente sull'area di studio, che rappresentano le componenti derivate della velocità lungo la direzione orizzontale (Vh) e lungo la verticale (Vv).



Risultato della scomposizione vettoriale per la frana in località Fano Adriano (Abruzzo). Nel pannello di sinistra vengono mostrati i movimenti lungo la direzione verticale, mentre a destra lungo quella orizzontale

3.3. Heatmap e interpolazione del dato PS

Un ulteriore strumento utile alla interpretazione del dato PS, indispensabile per passare da una informazione discretizzata nello spazio ad una continua sul versante di interesse, è la creazione delle *Heatmap*. Tali interpolazioni mirate consentono di estendere l'interpretazione del processo deformativo anche laddove manchi il punto di misura.



Esempio delle analisi spaziali per il comune di Fano Adriano, relative alla generazione di heatmap per la geometria discendente

A tal proposito la DGR Lazio n. 794/2024, nel caso di interpolazione di valori di velocità per la creazione dei cluster di spostamento dei PS, individua delle soglie dei parametri da utilizzare negli algoritmi di interpolazione:

- raggio di interpolazione = 50 m
- numero minimo di PS per procedere all'interpolazione = 6

Si può ritenere che tali algoritmi, assoggettati a taratura a scala territoriale, possano essere assunti nella pratica in tutto il Distretto dell'Appennino Centrale.

3.4. Sezioni interferometriche

La sezione interferometrica permette di visualizzare in modo dettagliato e chiaro come varia la velocità di deformazione del terreno lungo una specifica sezione di interesse. I PS riportati lungo la sezione vengono identificati e selezionati nell'intorno significativo (buffer) della sezione scelto dall'utente: come per la scomposizione vettoriale, è preferibile non inglobare all'interno del grafico punti troppo distanti dalla sezione di interesse, per evitare di visualizzare informazioni di spostamento riferibili a porzioni di terreno distanti da quella che si vuole investigare. Di seguito è riportato l'esempio di una sezione di interesse disegnata lungo un versante in deformazione per frana in località Apiro (Regione Marche). È possibile osservare come le velocità di deformazione dei PS aumentino nella porzione centrale della sezione (tra le progressive 150 e 300), in corrispondenza del corpo di frana, mentre decrescano in corrispondenza del piede di frana (a partire dalla progressiva 380) fino a stabilizzarsi su valori di spostamento nulli, non rappresentati in sezione ma visibili poco oltre la fine della traccia. Oltre alla visualizzazione del grafico relativo ai valori di spostamento o velocità in funzione delle progressive lungo la sezione, in alcuni casi risulta utile la visualizzazione dell'informazione di spostamento lungo il profilo topografico estrapolato per la sezione interferometrica di interesse.

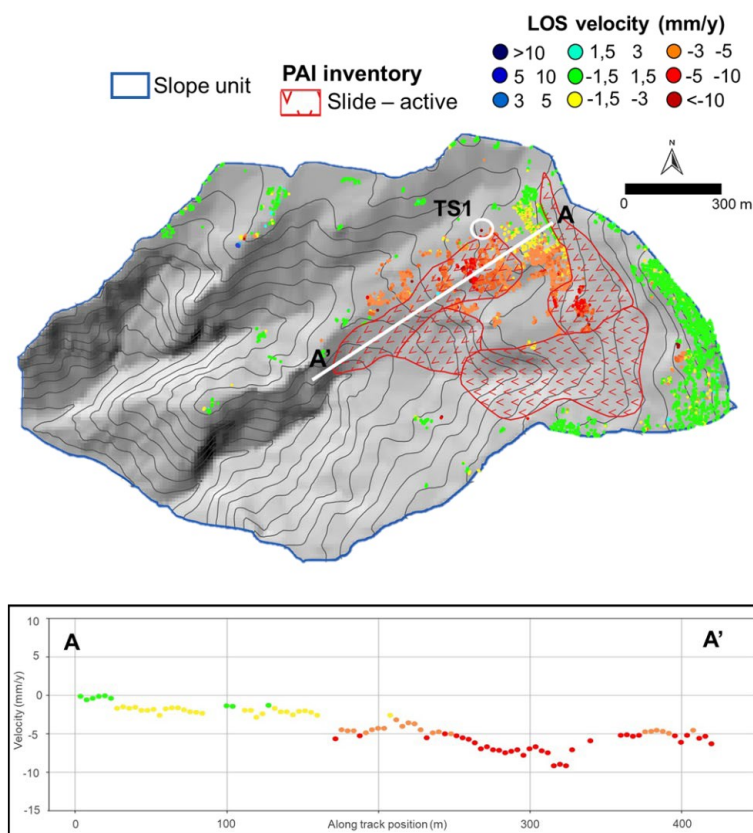


Figura: esempio di sezione interferometrica dell'area di interesse di Apiro (Marche) realizzata lungo il profilo AA' mostrato nel pannello in alto. Si evidenzia bene come i valori di velocità aumentino via via che si passa dalla zona di cresta del fenomeno franoso (localizzato a nord est) fino a quella di piede (sud ovest).

3.5. Valutazioni sullo stato di attività

In corrispondenza di fenomeni noti, per i quali sono correttamente applicabili le analisi PSI, è possibile investigare i tassi di spostamento medi annui relativi ad una porzione o alla totalità della superficie di un fenomeno.

Questa ricognizione può risultare determinante in fase di aggiornamento degli stati di pericolosità dei fenomeni, laddove risultasse necessario verificare l'applicabilità del grado di tutela imposto dalle norme, che il Piano associa allo stato di attività.

Rispetto ai dati di partenza è opportuno puntualizzare la necessità di effettuare una stima del rumore, della coerenza e della rappresentatività delle informazioni di spostamento rispetto ai fenomeni da investigare. In base a tali informazioni è infatti operato il corretto settaggio delle soglie di coerenza e velocità dei singoli PS, sulla base dei quali potrà essere stimato lo stato di attività.

Ipotesi di valore soglia sono state suggerite da vari autori, tanto da non potersi dichiarare definita una soglia univoca di "significatività".

In un possibile schema a matrice può essere richiamato lo schema seguente:

Matrice di attività	ERS < 2mm/anno (1992-2000)	ERS > 2mm/anno (1992-2000)
ENVISAT < 2 mm/anno (2002- 2008)	Stabilizzata	Quiescente
ENVISAT > 2 mm/anno (2002-2008)	Attiva (riattivata)	Attiva (continua)

Figura: esempio di matrice di attività

Tuttavia, soglie diverse da quella rappresentata (2 mm/anno) possono essere assunte con altrettanta ragionevolezza qualora siano riconosciute caratteristiche specifiche del contesto di studio (principalmente rispetto all'affidabilità dei riflettori, che può incidere sulla qualità delle interpretazioni nelle fasce border-line).

In tal caso la presentazione dell'elemento diagnostico oggetto delle presenti linee guida può fare riferimento a soglie diverse, motivando le considerazioni che sostengono lo scostamento, affinché nelle fasi istruttorie di competenza regionale e della Segreteria dell'Autorità possano essere utilizzate secondo criteri ponderati.

4. Disponibilità dei set di dati e relative linee guida

Per il territorio del Distretto dell'Appennino centrale sono ad oggi disponibili diversi set di dati che nel tempo sono stati prodotti da amministrazioni statali e regionali; nell'area del Cratere la stessa Autorità di bacino ha acquisito set di dati nell'ambito dell'Accordo con il Commissario Straordinario per la ricostruzione post-eventi sismici del 2016.

Di seguito si riporta un elenco dei dataset disponibili, la relativa copertura e i rispettivi periodi di acquisizione:

Denominazione	Satellite - orbita	area	periodo
PST	CSK - asc, dsc	nazionale	2010 - 2014
PST	ENVISAT - asc, dsc	nazionale	2008 – 2010
PST	ERS - asc, dsc	nazionale	1992 - 2000
Regione Toscana	Sentinel 1 - asc, dsc	regionale	dal 2015
Regione Lazio	Sentinel 1, CSK - asc, dsc	regionale AOI	2015 - 2022
EGMS	Sentinel 1 - asc, dsc	europea	dal 2015
ReStart	Sentinel 1, CSK – asc, dsc	sisma 2016	2014 - 2021

Avvertenza: sebbene i sopra riportati dataset presentino le medesime caratteristiche in termini di tipologia di informazioni, i contenuti degli stessi non possono essere considerati omologhi. Infatti, le informazioni relative agli spostamenti del singolo PS possono essere differenti in funzione della tecnica di elaborazione utilizzata e dell'estensione dell'area; pertanto, la corretta interpretazione degli eventuali spostamenti misurati non può prescindere dalla puntuale verifica delle caratteristiche specifiche delle singole elaborazioni e l'utilizzo delle linee guida che accompagnano ogni dataset oggetto di consultazione ed eventuale elaborazione.

Al fine di agevolare l'utente nel reperimento di tali informazioni si riportano di seguito i collegamenti alle informazioni relative ad ognuno dei sopra citati dataset, validi al momento della stesura del presente documento.

Denominazione	collegamento
PST	https://gn.mase.gov.it/portale/prodotti-interferometrici
Regione Toscana	https://geoportale.lamma.rete.toscana.it/difesa-suolo/#/viewer/326
Regione Lazio	https://geologilazio.it/wp-content/uploads/2024/11/DGR-794-15-10-24-BUR-032613.pdf
EGMS	https://land.copernicus.eu/en/products/european-ground-motion-service
ReStart	Dati e informazioni su specifica richiesta da inviare a: protocollo@pec.autoritadistrettoac.it

Eventuali fonti di acquisizione ed elaborazione che si dovessero formare nel corso del tempo saranno considerate altrettanto valide, ancorché i limiti d'uso debbano essere dichiarati dal proponente.