

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

SCUOLA DI SCIENZE
Dipartimento di Geoscienze
Direttore Prof. Nicola Surian

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN GEOLOGIA E
GEOLOGIA TECNICA

**VALUTAZIONE DELLE DEFORMAZIONI
DEL SUOLO MISURATE DA EGMS PER
LA ZONAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ**

Relatore: Prof. Filippo Catani

Laureanda: Palmieri Caterina
Matricola: 2013304

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

*A mamma Lella,
guerriera in Terra, angelo in Cielo*

*e a papà Tonio,
che ha spiccato il volo per raggiungerla,*

ci rincontreremo.

Abstract

The Earth's surface is in constant motion thanks to natural phenomena, such as volcanism and seismicity, and artificial phenomena, such as human activity. The Copernicus program has created a service called the European Ground Motion Service, EGMS, to monitor the movement in real time and understand the dynamism of the Earth's soil, subsequently creating maps from the data obtained.

The Copernicus program has created services that occupy different sectors thanks to the use of satellites that provide data in real time. From here, the description of the Sentinel-1 satellite is introduced, which provides radar images day and night, in all weather conditions through Synthetic Aperture Radar technology and its technical characteristics that allow its creation. Radar images are matrices of pixels that contain information and by using differential interferometry (DInSAR) it is possible to obtain maps of deformations that allow a better interpretation of the phenomenon of ground movement. To obtain this final result, all the steps of the multi-interferogram processor have been described.

The main topic of the thesis, the EGMS, explains in detail the main features, its operation and examines the products it makes available. They are used differently depending on the user's work purpose, their professionalism and handling and are divided into Basic, Calibrated and Ortho. Together with the products, the attributes are also provided, essential because they contain detailed information to describe the characteristics of each monitored point. They are used to accurately analyze and interpret the data relating to soil displacement.

Once the technical description is concluded, we move on to the geographical framework of the study areas of the Province of Belluno, the Province of Vicenza and a part of the Tuscany Region, specifying the local landslide phenomena and their main causes. Analyzing the two Provinces, we can see the difference from an environmental point of view, as Belluno is more mountainous, while in Vicenza the plain predominates.

The methodology section explains the information that the attributes can provide and how they should be interpreted according to their definition and how the data downloaded from the service are organized within the project, such as the data collection period and the orbits selected for each area of interest.

Within them, statistics are made of the EGMS points to have a precise idea of their quantity and quality, thanks to the use of the ArcGIS software. The measurement points are also integrated with the polygons, corresponding to the areas affected by landslides, downloaded from the Italian Landslide Phenomena Inventory. It is important to underline the fact that within the landslide polygons, the points can also confirm the presence of instability phenomena based on the average speed of the ground movement.

In conclusion, the statistics within the landslide polygons show a high density of stable points compared to unstable ones. There are many factors regarding this contrast, for example, most landslides occur in mountainous areas where fewer measurement points are recorded and are less reliable. It is therefore important not to use EGMS data individually, but to process them by integrating them with other data from other sources in order to obtain a correct and consistent final interpretation.

Indice

1. Introduzione	1
2. Copernicus	3
2.1 Sentinel-1	4
2.2 Immagini Radar	9
2.3 Interferometria differenziale (DInSAR)	12
2.4 Processore Generico Multi-Interferogramma InSAR	15
2.4.1 Selezione dell'immagine di riferimento	16
2.4.2 Co-registrazione	17
2.4.3 Interferogrammi differenziali	17
2.4.4 Selezione degli MP	19
2.4.5 Fase di scarto	21
2.4.6 Elaborazione atmosferica	22
2.4.7 Generazione delle serie temporali di spostamento per ciascun MP	23
2.4.8 Geocodifica	25
2.4.9 Risultati	26
3. EGMS	27
3.1 Prodotti	32
3.1.1 Prodotto Base	32
3.1.2 Prodotto Calibrato	33
3.1.3 Prodotto Ortho	33
3.2 Attributi	35
3.3 Aggiornamento dei dati	38
4. Inquadramento geologico	41
4.1 Belluno	41
4.2 Vicenza	45
4.3 Toscana	48
5. Metodologia	51

5.1 Formato dei dati	51
5.2 Belluno	57
5.3 Vicenza	67
5.4 Toscana	72
6. Analisi	81
6.1 Punti EGMS	81
6.2 Frane IFFI	85
7. Risultati e discussione	89
7.1 Belluno	89
7.2 Vicenza	101
7.3 Toscana	111
Conclusioni	122
Bibliografia	124
Sitografia	133
Ringraziamenti	

1. Introduzione

La superficie della Terra è in continuo movimento grazie ai fenomeni naturali, come la sismicità e il vulcanismo, ed a quelli dovuti alle attività umane, come l'estrazione mineraria. Tali attività, di conseguenza, possono provocare forti impatti sugli ecosistemi dell'ambiente e sulle infrastrutture.

Per potersi adattare al suo dinamismo è fondamentale monitorare il movimento del suolo e stabilire delle strategie di prevenzione dei rischi. È una misura di consapevolezza che porta l'utente a cercare delle informazioni complete, soprattutto affidabili.

I modelli di deformazione vengono individuati in base alla velocità media per analizzare le caratteristiche spaziali del suolo terrestre. Grazie ad un lungo processo di registrazione del movimento del terreno si creano delle serie temporali, fondamentali per l'utente per farsi un'idea dei modelli temporali o dei fenomeni specifici rilevati. Infatti egli può utilizzare tale servizio come materiale di riferimento per studiare i rischi geologici o creare delle tendenze basate sulla storia delle deformazioni.

Il servizio EGMS è utilizzato in molti campi di applicazione, dai rischi geologici all'ingegneria civile e delle infrastrutture, dal patrimonio culturale al campo minerario, petrolifero e del gas. Tale servizio dà la possibilità all'utente di usufruire dei prodotti di diversi livelli per una varia gamma di obiettivi diversi tra loro, a seconda dello scopo di studio.

Nell'ambito dei rischi geologici, tale prestazione risulta molto efficace per monitorare i fenomeni di subsidenza, frane, tettonica e dei vulcani, quindi fenomeni di dinamismo del terreno.

Entrando nel dettaglio, l'analisi della doppia orbita, la scomposizione dello spostamento verticale ed orizzontale e l'integrazione dell'analisi topografica basata su DEM sono necessarie per l'identificazione delle aree potenzialmente a rischio e/o critiche di frane. Non tutti i dissesti possono essere misurati, come ad esempio i debris flow o i ribaltamenti, perché sono eventi molto rapidi e possono non essere rilevati. Per questo è importante conoscere la soglia della velocità di movimento, che per letteratura è imposta ad un valore inferiore a 2 mm/giorno. Gli effetti geometrici e il rivestimento del suolo influenzano la copertura del punto di misurazione sul corpo franoso.

Gli Enti possono sfruttare il servizio EGMS per monitorare lo stato di attività e realizzare una mappa di pericolosità per una pianificazione urbana o per la protezione civile, oppure per aggiornare i database, gli inventari e le carte geografiche.

È importante sottolineare che l'EGMS rappresenta una vera e propria informazione di riferimento, come fonte valida, grazie ai suoi risultati armonizzati ed ai prodotti di dati coerenti.

Le Regioni possono integrare i dati del servizio nei loro Geoportali insieme agli altri dati territoriali in modo da poter visualizzarli in un'unica schermata, come per esempio con i modelli digitali del terreno per comprendere il tipo di ambiente in cui sono collocati i punti, oppure con i file che contengono i poligoni delle zone interessate da frane o delle zone interessate da aree franose. Tali dati provengono dall'Inventario del Fenomeni Franosi Italiano, IFFI, che offre un quadro dettagliato sulla distribuzione dei fenomeni di dissesti sul territorio italiano.

Lo scopo della tesi è quello di dimostrare l'affidabilità dei dati EGMS con i dati dettagliati forniti dalle Regioni, dove sono state fatte delle analisi più approfondite, sono stati fatti dei sopralluoghi, raccolti materiali necessari per dei confronti. Le Regioni di riferimento per il progetto sono la Regione del Veneto e della Toscana, due ambienti diversi e quindi punti di misurazione svariati per comprendere, attraverso l'analisi e l'applicazione delle metodologie, se il metodo intrapreso è idoneo a dimostrare la tesi.

2. Copernicus

Il programma *Copernicus* dell'Unione Europea è un grande ed importante progetto in quanto è stato creato per fornire delle informazioni precise ed aggiornate, tramite l'osservazione e il monitoraggio del nostro pianeta terrestre con differenti sistemi, come i satelliti, le stazioni terrestri, i sensori aerei e marini.

Il nome è stato scelto in onore dello scienziato ed osservatore europeo Niccolò Copernico che ha formulato il modello eliocentrico dell'universo. Esso è gestito dalla Commissione Europea, insieme all'ESA (Agenzia Spaziale Europea), l'Organizzazione europea per l'utilizzo dei satelliti meteorologici (EUMETSAT), il Centro europeo per le previsioni meteorologiche a medio termine (ECMWF), le agenzie dell'UE e Mercator Ocean International. Fornisce informazioni molto varie, grazie all'utilizzo di una vasta gamma di tecnologie che copre molte aree applicative ed aspetti della Terra, tempestivamente, accuratamente, gratuitamente e facilmente accessibile. Tra queste applicazioni vi è il monitoraggio del territorio e dei costi, il monitoraggio dei disastri, come vulcani e terremoti ed il cambiamento climatico. Sono presenti diversi servizi che vanno dall'atmosfera all'ambiente marino, dal territorio alla sicurezza, a seconda degli scopi di lavoro.

Il motore principale che alimenta il programma Copernicus sono i satelliti Sentinel, costruiti e gestiti direttamente dall'ESA, e sono sei, ciascuno progettato per scopi specifici. Sono supportate dal Copernicus Ground Segment, che coordina le operazioni satellitari, come l'acquisizione, la produzione e la diffusione dei dati.

L'ESA gestisce la componente spaziale e mette a disposizione per tutti gli utenti dei dati satellitare disponibili attraverso i satelliti Sentinel e le missioni Copernicus Contributing a livello nazionale, europeo e internazionale.

Successivamente, i servizi Copernicus trasformano i dati raccolti dai satelliti in informazioni, attraverso l'analisi e l'elaborazione. Tali servizi rientrano in sei categorie principali, quali la gestione del territorio, l'ambiente marino, l'atmosfera, la risposta alle emergenze, la sicurezza e i cambiamenti climatici. Infatti, dalle immagini satellitari sono state generate delle mappe, individuate delle proprietà e delle anomalie e ricavate delle statistiche. Lo scopo principale di Copernicus è di modellare il futuro del pianeta Terra per riuscire a viverci in sicurezza.

2.1 Sentinel-1

Il primo satellite, Sentinel-1A, è stato lanciato il 3 Aprile 2014 ed è stato creato per fornire immagini radar giorno e notte ad alta risoluzione, indipendentemente da qualsiasi condizione meteorologica grazie alla tecnologia Radar ad Apertura Sintetica (SAR) in banda C, che ha una frequenza pari a 5,405 GHz e quindi 5,6 cm di lunghezza d'onda λ , per i servizi terrestri ed oceanici (Figura 2.1.1).

Sentinel-1, posto ad un'altitudine di 693 km, percorre un'orbita quasi polare ed eliosincrona, monitorando, in ogni passaggio, quasi tutta la superficie terrestre con delle condizioni di luce analoghi tra loro, con un ciclo orbitale di dodici giorni (*revisiting time*) e 175 orbite per ciclo per un singolo satellite.

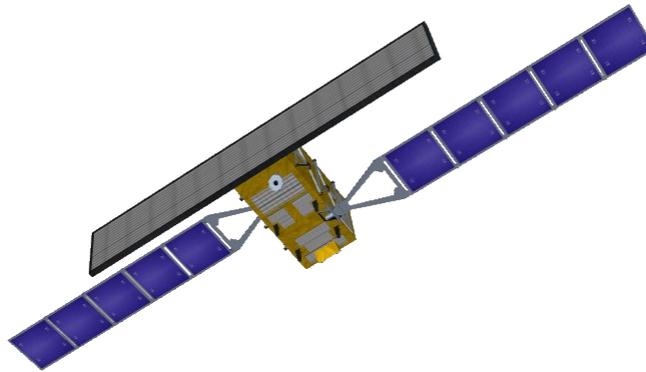


Figura 2.1.1 Rappresentazione della sonda Sentinel-1 dispiegata (ESA)

Nell'Aprile del 2016, Sentinel-1B lo ha raggiunto ed entrambi hanno condiviso lo stesso piano orbitale con una differenza di fase orbitale di 180° . Con l'utilizzo di entrambi i satelliti, i tempi di rivisitazioni sono stati ridotti a sei giorni. Purtroppo, da Dicembre 2021 il secondo satellite non è stato in grado di fornire nuovi dati radar a causa di un malfunzionamento che riguarda il sistema di alimentazione elettrica e, quindi, il campionamento temporale è ritornato a dodici giorni.

È previsto per la fine del 2024 il lancio di Sentinel-1C per garantire la continuità dei dati.

Gli obiettivi di tale missione comprendono proprio il monitoraggio dei fenomeni naturali e non, sia sulla terraferma che in mare e nelle regioni artiche, fornendo supporto alla coordinazione dei rischi e delle emergenze, alla gestione delle foreste e delle zone agricole e tanti altri.

Il percorso orbitale dev'essere controllato rigorosamente, a causa delle caratteristiche geometriche di InSar. Il posizionamento del satellite dev'essere particolarmente accurato, con un puntamento preciso ed una sincronizzazione temporale tra le coppie interferometriche. Il controllo è definito utilizzando un tubo orbitale largo 50 m di raggio attorno ad un tracciato nominale dell'orbita e la sonda è mantenuta all'interno di tale tubo per tutta la sua durata operativa (Figura 2.1.2).

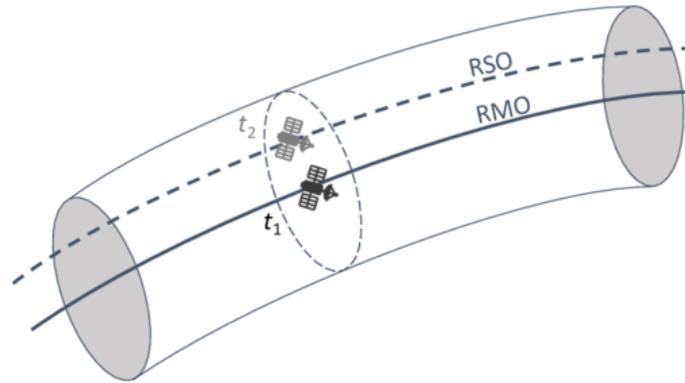


Figura 2.1.2 Rappresentazione del tubo orbitale Sentinel-1 (Macchiarulo, 2022)

La missione Sentinel-1 opera in quattro modalità di imaging, come illustrato nella Figura 2.1.3, in base alle risoluzioni ed ai swath (larghezza della porzione di superficie terrestre acquisita dal sensore durante il percorso della sonda intorno alla Terra) diversi:

- Stripmap (SM): 80 km di larghezza della striscia con una risoluzione spaziale di 5x5 m
- Interferometric Wide Swath (IW): copertura di 250 km con risoluzione pari a 5x20 m
- Extra Wide Swath (EW): striscia di 410 km, la massima, e 20x40 m di risoluzione
- Wave (WV): copertura pari a 20x20 km e risoluzione equivalente a 5x5 m

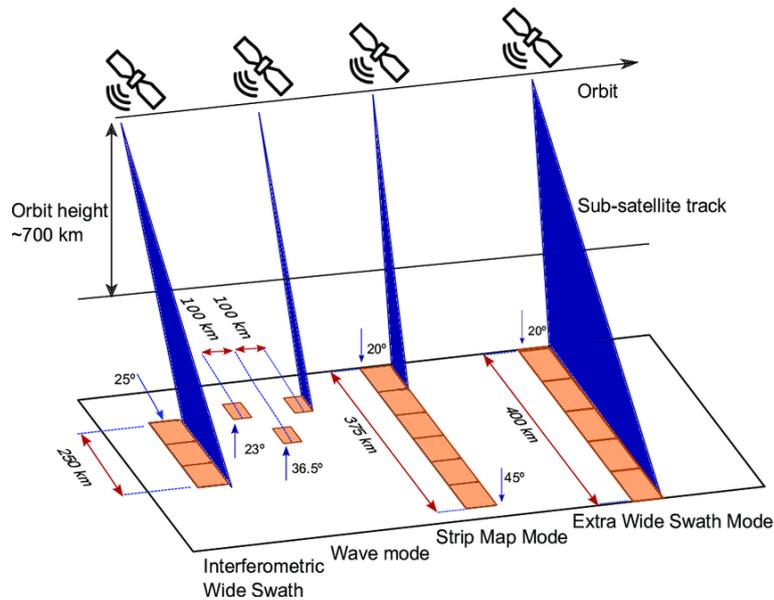


Figura 2.1.3 Modalità di imaging del satellite Sentinel-1 durante il suo percorso orbitale (Fabiano et al., 2022)

Grazie ad un sistema di trasmissione interscambiabile da H a V e a due sistemi di ricevitori paralleli per polarizzazioni H e V, c'è la possibilità di sfruttare diverse opzioni di polarizzazione, fondamentali per distinguere tra diversi tipi di superfici e materiali. A seconda della struttura della zona colpita, si possono verificare diversi backscattering quando il bersaglio viene colpito da sensori con orientamento diverso. Come risultato finale si possono ottenere dati SAR a singola polarizzazione, cioè solo una polarizzazione viene trasmessa e ricevuta, come VV (trasmissione verticale e ricezione verticale) e HH, oppure a doppia polarizzazione, cioè una viene trasmessa e due vengono ricevute. come HH+HV e VV+VH. Solitamente Sentinel-1 utilizza la modalità di polarizzazione verticale, ma il sistema può essere impostato anche sulla modalità orizzontale, quindi i dati finali per tale satellite sono VV e VH.

Nella Figura 2.1.4 mostra come le diverse polarizzazioni del radar interagiscono con l'oggetto colpito. Nel primo caso (a) HH, orizzontale trasmesso e ricevuto, lo scattering avviene principalmente sulle superfici più lisce, come il suolo, o lungo le componenti orizzontali degli oggetti; in (b) con la modalità HH e VH, orizzontale trasmesso, verticale ricevuto e viceversa, la diffusione si verifica in modo incrociato, perché vengono catturate delle informazioni sulla struttura interna dei bersagli; nell'ultimo caso (c) VV, verticale

trasmesso e ricevuto, è utile per osservare aree come vegetazione o mare, con un forte ritorno da superfici verticali.

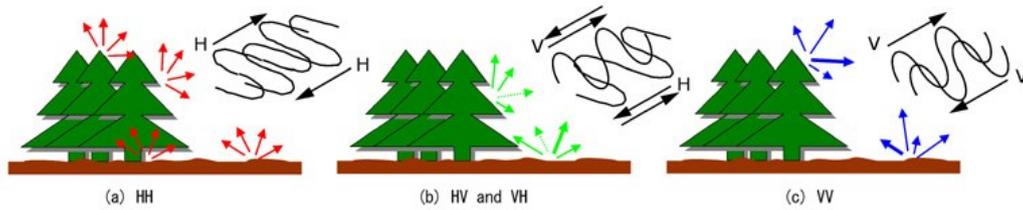


Figura 2.1.4 Diversi esempi di polarizzazione sul bersaglio colpito

La modalità standard sulle masse terrestri è l'IW, in formato Single Look Complex (SLC). Tale formato permette di fornire dati in una griglia che segue la geometria originale dell'acquisizione radar con informazioni riguardanti l'ampiezza e la fase.

Essa acquisisce tre sub-swath per immagine, ciascuna delle quali è composta da una serie di 9 burst impilate nella direzione dell'azimuth (Figura 2.1.5).

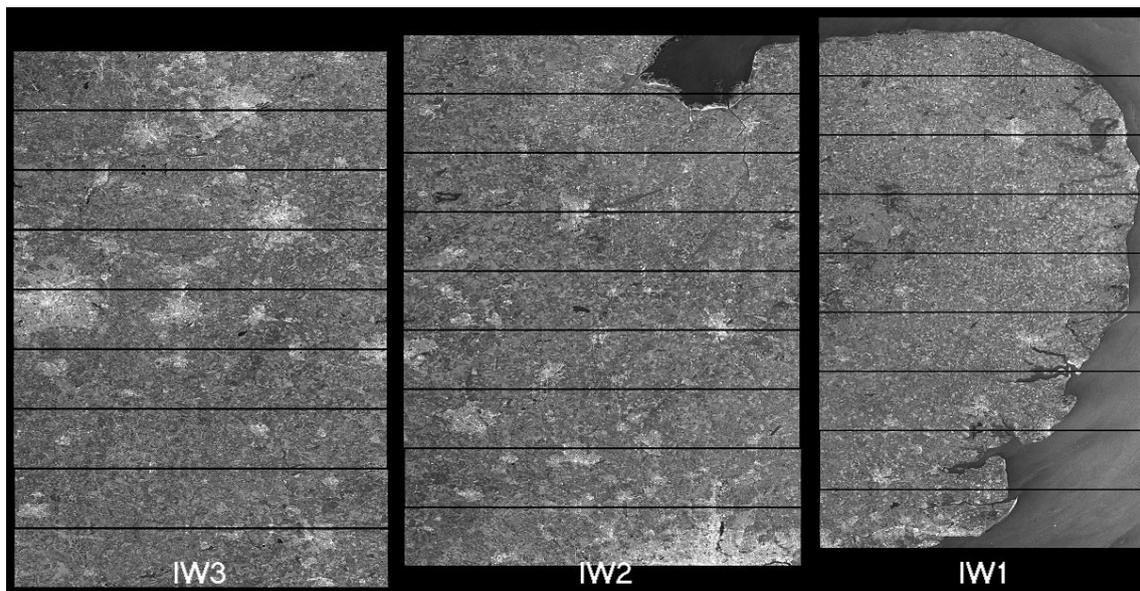


Figura 2.1.5 Visualizzazione dei tre sub-swath e rispettivi burst

L'acquisizione di tali sub-swath avviene utilizzando la tecnica Terrain Observation with Progressive Scans SAR (TOPSAR), in modo da avere delle immagini con un rapporto segnale/rumore quasi uniforme e quindi una qualità migliore dell'immagine. TOPSAR è un'evoluzione della modalità ScanSAR che permette di coprire aree ampie riducendo la risoluzione spaziale rispetto alle modalità a fascio stretto. In pratica il radar scansiona

periodicamente più sub-swath lungo il percorso del satellite, la tecnica TOPSAR applica una transizione graduale e continua tra diverse sotto-regioni, in modo da ridurre le variazioni brusche, grazie al movimento dinamico e controllato del fascio radar che elimina le disomogeneità radiometriche.

Tra il satellite che percorre la sua orbita e la Terra che ruota intorno al proprio asse, il sensore rileva la stessa area geografica sia durante un passaggio del satellite in direzione Nord-Sud, geometria discendente, illuminando la zona da Ovest verso Est sia durante un passaggio in direzione Sud-Nord, geometria ascendente, con lo sguardo del sensore rivolto da Est verso Ovest, come mostrato nella Figura 2.1.6.

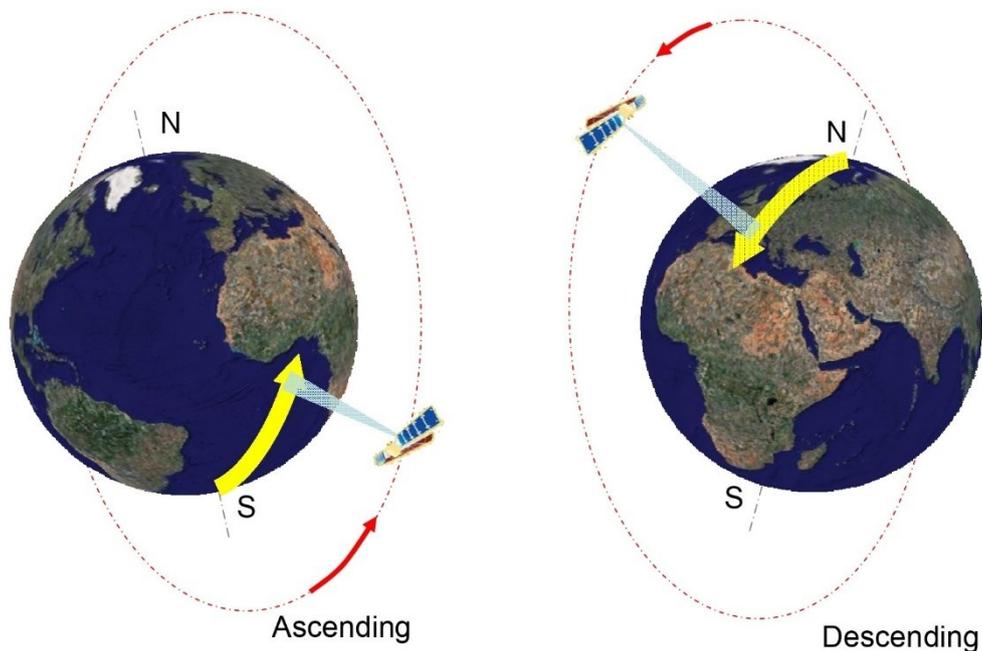


Figura 2.1.6 Direzioni ascendente e discendente percorsi dall'orbita

La possibilità di raccogliere dati in due geometrie di acquisizione opposte è una caratteristica che può essere sfruttata per recuperare più informazioni possibili su determinate aree di studio da più punti di vista. Un esempio illustrato in Figura 2.1.7: in caso di versanti esposti in direzione est o ovest, la scelta della geometria di acquisizione è importante, mentre per i versanti esposti a nord o sud, essi risultano visibili in entrambe le geometrie.

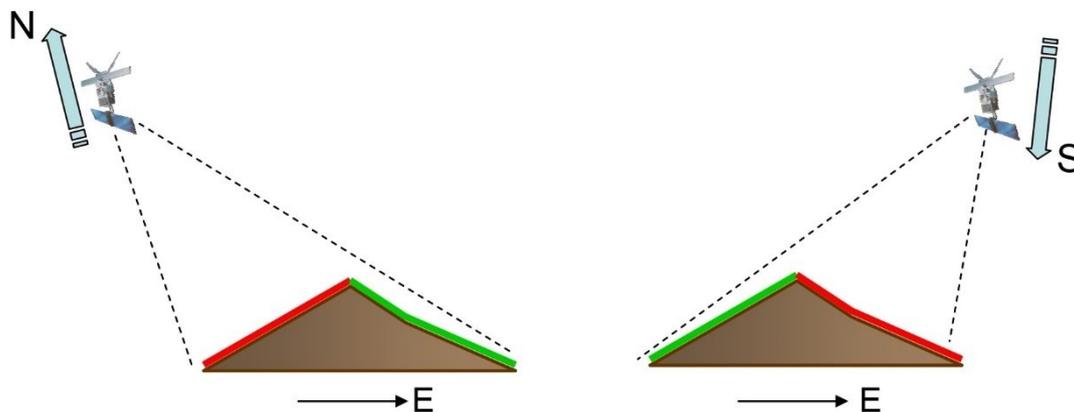


Figura 2.1.7 Illustrazione di versanti monitorabili con la geometria discendente a destra e quella ascendente a sinistra. I versanti evidenziati in verde sono monitorabili, mentre quelli in rosso non sono rilevati

2.2 Immagini Radar

Le immagini radar riportano le coordinate SAR, che sono espresse in direzioni di azimuth e range. La prima è parallela all'orbita e, quindi, alla direzione Nord-Sud, mentre la seconda è il legame sensore-bersaglio, detto anche Line Of Sight (LOS).

La direzione di trasmissione dei sensori satellitari è ortogonale alla direzione del volo, quindi l'inclinazione dell'antenna rispetto alla direzione che punta direttamente sotto il sensore, nadir, viene definita angolo di incidenza (off-nadir angle, θ). Tale angolo può assumere valori compresi tra 20 e 50 gradi. A causa della curvatura della sfera terrestre, l'angolo d'incidenza della radiazione (α) su un terreno orizzontale piatto è maggiore dell'angolo di visione. La direzione lungo la linea di vista del sensore è denominata slant range, o range (Figura 2.2.1)

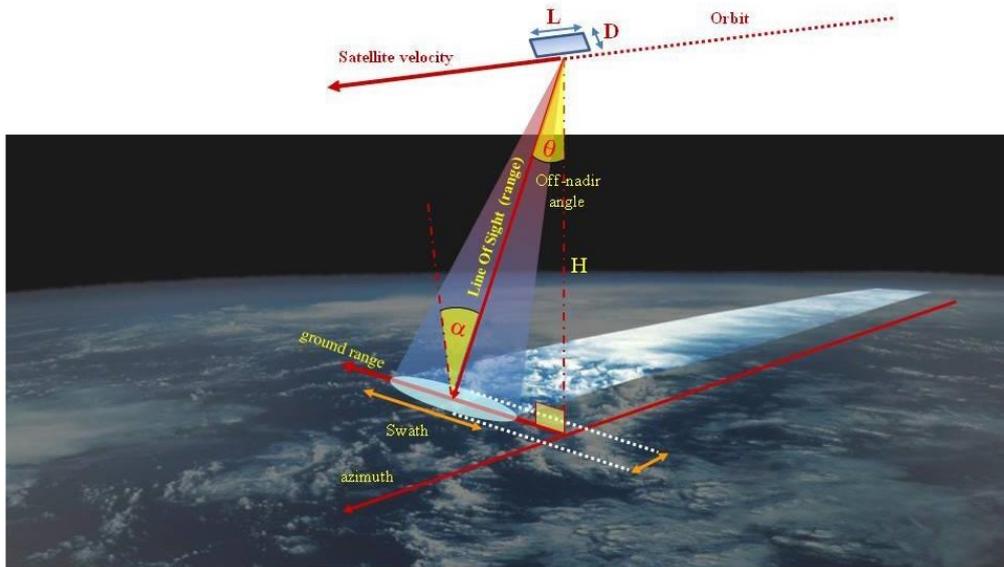


Figura 2.2.1 Geometria di acquisizione del Sentinel-1 (Ferretti, 2014)

La risoluzione spaziale in azimuth di un radar è direttamente proporzionale alla lunghezza d'onda (λ) del sensore e alla distanza del bersaglio (R_0), ma inversamente proporzionale alla dimensione dell'antenna radar (D):

$$L \approx \frac{R_0 \lambda}{D}$$

Si deve precisare che i sistemi radar inviano segnali elettromagnetici lateralmente lungo una linea inclinata di un angolo θ rispetto alla LOS. Ciò significa che la modalità di acquisizione non perpendicolare al suolo produce delle deformazioni prospettiche nelle immagini focalizzate dovute alla topografia del terreno. Se ne distinguono tre:

- si verifica il fenomeno di *foreshortening* quando un pendio rivolto verso il satellite appare schiacciato nell'immagine radar rispetto ad un'osservazione perpendicolare al terreno. Tale manifestazione accade perché la distanza percorsa dal segnale radar per raggiungere la parte superiore del pendio è più breve rispetto alla distanza per raggiungere la base, facendo sembrare l'intera zona più compressa. L'effetto sarà visibile come una "striscia" più luminosa e stretta rispetto alla realtà.

- quando la parte superiore di un rilievo è più vicina al satellite rispetto alla base, il segnale radar riflette prima dalla cima del rilievo e poi dalla base, producendo il fenomeno di *layover*. In questo caso si inverte la posizione degli elementi nel rilievo, risultando in un'immagine in cui la cima appare più vicina e sovrapposta alla base, quindi non è possibile distinguere la sequenza corretta di punta e base. Nell'immagine un rilievo molto ripido apparirà distorto e “spostato” con la parte superiore visibilmente sovrapposta a quella inferiore.
- il *shadowing* si verifica quando un pendio è rivolto nella direzione opposta alla LOS. Qui, il segnale radar non riesce a vedere cosa c'è dall'altra parte del pendio, creando un'area di “ombra” nell'immagine radar. Ad esempio, dietro una montagna, il pendio rivolto nella direzione opposta alla sonda sarà invisibile e quindi risulterà un'area nera.

Ecco illustrato nella Figura 2.2.2 come vengono visualizzati i diversi effetti geometrici.

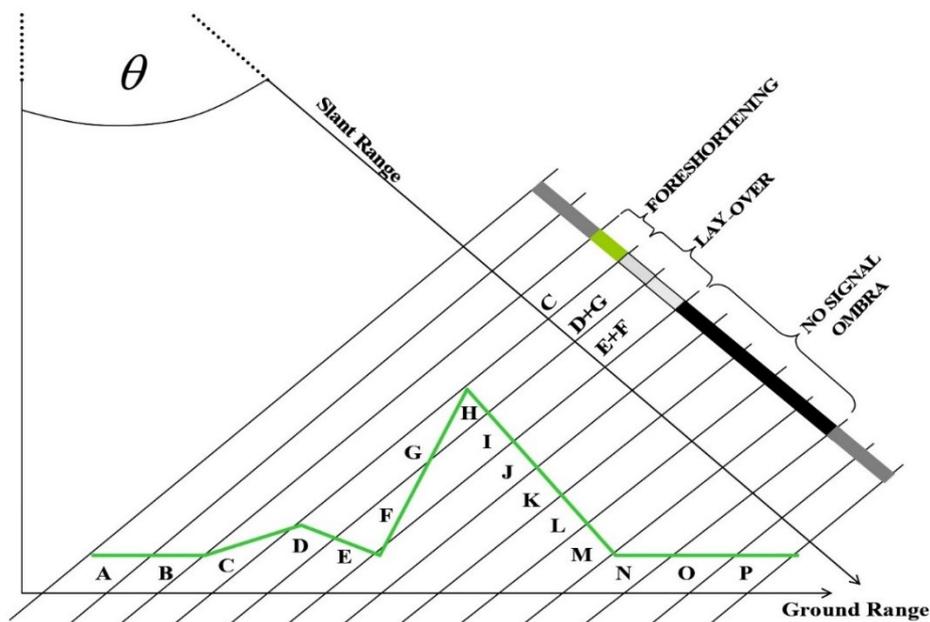


Figura 2.2.2 Illustrazione delle distorsioni geometriche

Questi effetti si notano di più solo nelle aree con topografia più ripida e impediscono o limitano fortemente l'identificazione dei punti di misurazione. Grazie agli angoli di visualizzazione opposti si riducono questi effetti geometrici. Nella Figura 2.2.3 è

rappresentato un esempio delle distorsioni geometriche con riferimento all'area del Monte Vesuvio.

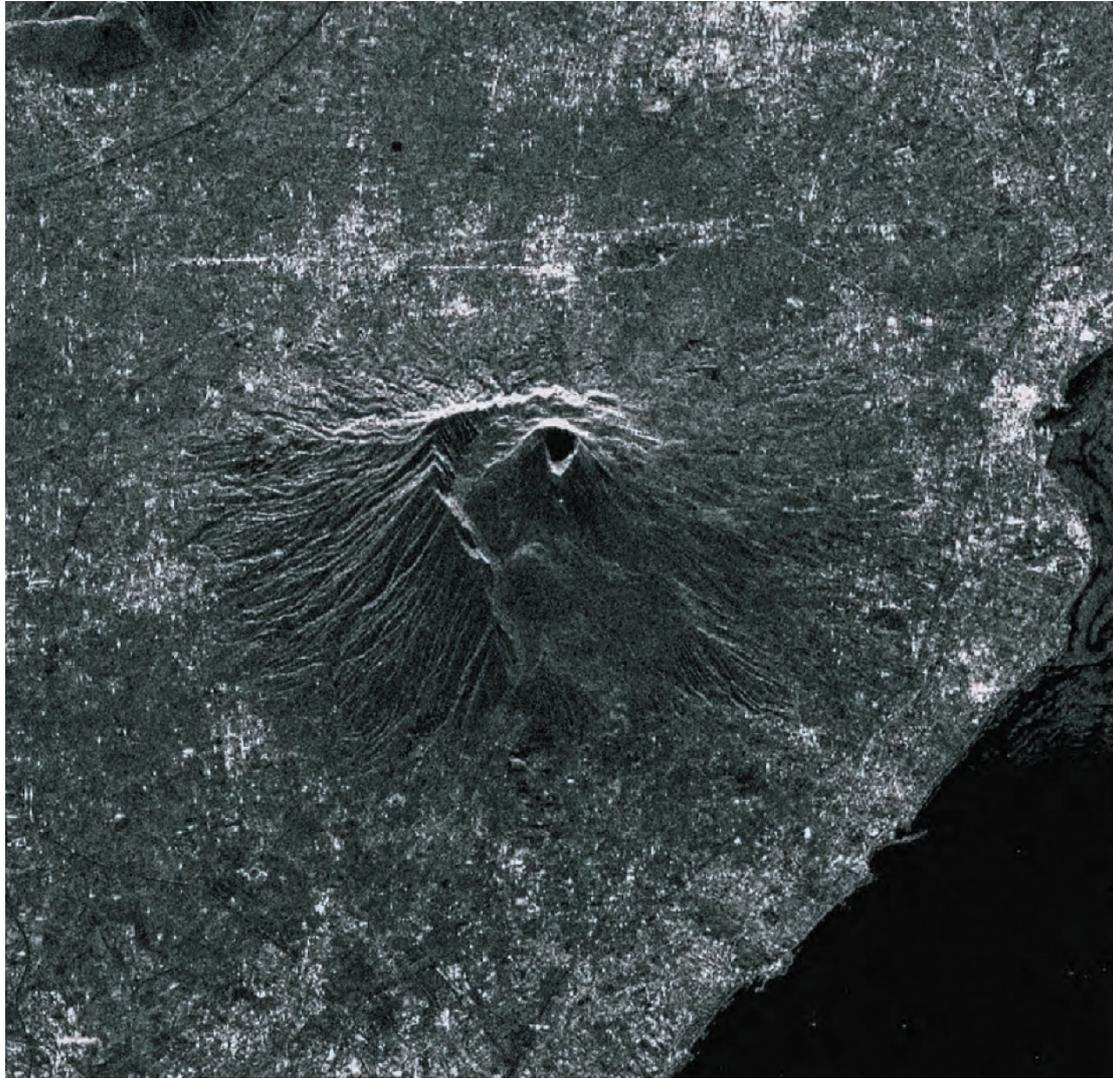


Figura 2.2.3 Area del Monte Vesuvio. La direzione di visualizzazione è verticale sull'immagine (Ferretti et al., 2007)

2.3 Interferometria differenziale (DInSAR)

Il radar è uno strumento trasmittente che illumina l'area circostante con un'onda elettromagnetica che, incidendo sulla superficie della Terra, viene riflessa con un fenomeno di riflessione, la diffusione, o scattering. Per questo motivo viene considerato come un "sistema attivo", perché emette la propria radiazione mirata come un impulso e quindi registra l'ampiezza ed il ritardo del segnale retrodiffuso. Una parte dell'area diffusa ritorna verso l'apparecchio trasmittente, che funge anche da ricevente, e vengono

analizzate le sue caratteristiche. Si può osservare l'immagine radar come una matrice di pixel definiti dalle grandezze di ampiezza e fase, perciò si può definire tale immagine SAR coerente, perché contiene entrambe le informazioni. I valori di ampiezza indicano l'intensità di un segnale radar in corrispondenza alla quantità di energia elettromagnetica retrodiffusa verso la sonda da un bersaglio, quindi appaiono particolarmente luminose le strutture metalliche, come i tralicci, le antenne e le linee ferroviarie, mentre risultano poco luminosi i bacini d'acqua e le strade.

I valori di fase sono molto importanti in ambito interferometrico, perché corrispondono alla distanza dal sensore all'oggetto colpito. I fattori che contribuiscono alla fase di un pixel di un'immagine SAR sono molteplici:

$$\phi = \Psi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2r + \phi_a + n$$

dove Ψ è la componente di fase associata alla riflettività del bersaglio, $2r$ è il percorso di viaggio bidirezionale, ϕ_a contributo di fase dovuto all'atmosfera ed n è il rumore.

Se si confrontano due immagini della stessa area acquisite in tempi diversi, ma dalla stessa posizione, si effettua una misurazione dello spostamento del terreno. Per determinare gli effetti contributivi di fase dovuti al movimento del bersaglio, l'interferometria differenziale sfrutta la differenza di fase di un'acquisizione a quella dell'altra (*phase shift*). Combinando la fase di tali immagini dopo la coregistrazione, si genera un'interferogramma, le cui frange di interferenza sono dovute al movimento del terreno (Figura 2.3.1).

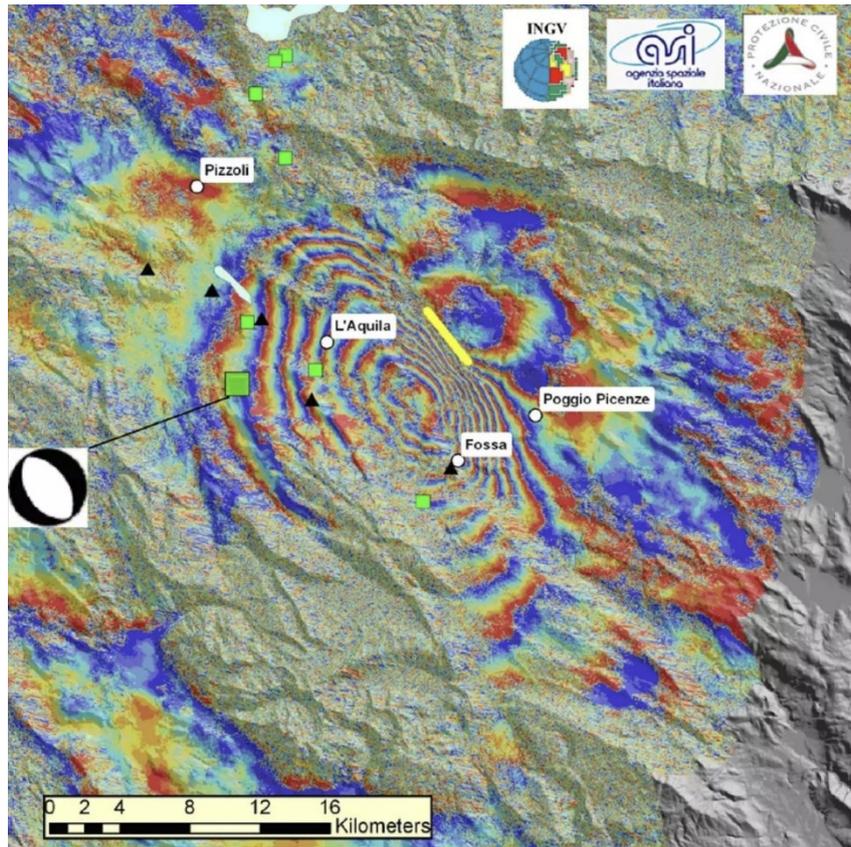


Fig. 2.3.1 Esempio di un'interferogramma in seguito al terremoto dell'Aquila

La fase interferometrica φ , cioè la fase di ciascun pixel dell'interferogramma, è la somma dei seguenti componenti:

$$\varphi = \varphi_d + \varphi_a + \varphi_t + v$$

La componente di spostamento, φ_d , è data dalla differenza nella posizione del bersaglio tra le due immagini SAR misurata nella linea di vista del sensore. La perturbazione dell'atmosfera delle onde elettromagnetiche emesse dal sensore è espressa dalla componente atmosferica φ_a . Il fattore topografico, φ_t , è indotto dalle diverse geometrie di acquisizione al momento della cattura dell'immagine, che può essere ridotta sfruttando delle informazioni preliminari sulla topografia locale, come l'utilizzo di un modello digitale di elevazione DEM della zona di studio. Infine v rappresenta il rumore ed è la somma di due contributi: decorrelazione geometrica, variazioni nella geometria di acquisizione che influenzano l'intera immagine, e decorrelazione temporale, variazione delle caratteristiche all'interno della foto nel tempo.

Gli interferogrammi possono essere classificati in base a due parametri principali: al tempo trascorso tra le due immagini acquisite utilizzate per generare un'interferogramma (linea di base temporale, B_t), ed alla differenza di posizione del sensore tra le due acquisizioni (linea di base normale, B_n). Più il periodo di separazione è breve, maggiore è il rapporto segnale-rumore dell'interferogramma e migliore è la coerenza di fase, mentre la qualità della fase interferometrica diminuisce all'aumentare della linea di base normale, perché il sistema diventa più sensibile alla topografia locale.

2.4 Processore Generico Multi-Interferogramma InSAR

I Prodotti EGMS vengono realizzati da un gruppo che comprende quattro diversi InSAR Processing Entities (IPE): E-Geos, TRE ALTAMIRA, NORCE e GAF/LDR. Nonostante le differenze negli algoritmi di lavorazione utilizzati da ciascun ente, i prodotti finali soddisfano tutti i requisiti del servizio in termini di coerenza, qualità e omogeneità.

La tecnica di base si basa sul principio dell'interferometria InSAR attraverso l'approccio della Persistent Scatterer Interferometry (PSI). Essa è strutturata in due fasi principali: prima si svolge lo scarto degli interferogrammi su una griglia dei candidati PS (PSC), poi si procede alla rimozione degli effetti atmosferici, all'individuazione dei punti utili ed infine alla generazione dei risultati finali (Figura 2.4.1).

In questa sezione verranno illustrate le principali fasi operative di un generico processore InSAR multi-interferogramma che portano alla realizzazione del prodotto finale.

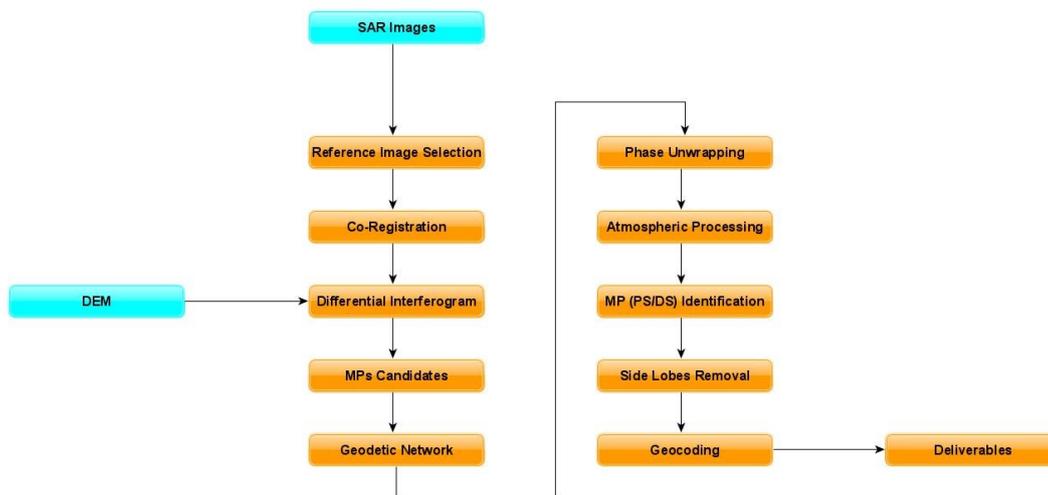


Fig. 2.4.1 Rappresentazione dei diversi passaggi per l'elaborazione delle immagini InSAR (Ferretti et al., 2023)

2.4.1 Selezione dell'immagine di riferimento

L'individuazione di un'immagine base è un passaggio essenziale durante il processamento. Dato un set di immagini SAR con la stessa geometria di acquisizione, si sceglie una "primaria" come riferimento per la co-registrazione e la generazione degli interferogrammi. La scelta si basa sull'ottimizzazione della baseline geometrica (riferita alla distanza orbitale) e temporale e della coerenza media: nel primo caso si cerca di minimizzare la dispersione dei valori geometrici e temporale rispetto alle altre immagini, mentre nel secondo caso si massimizza il rapporto segnale-rumore atteso di tutti gli interferogrammi. Tale ottimizzazione viene eseguita attraverso un'espressione matematica:

$$\max_i \left\{ \sum_{j=1}^N \left(1 - \frac{|B_n^{ij}|}{B_c} \right) \cdot e^{-|B_t^{ij}|/\tau} \right\}$$

B_n^{ij} e B_t^{ij} rappresentano rispettivamente le baseline geometrica e temporale tra le immagini i e j . La baseline critica del sistema, B_c , dipende dalla larghezza della banda radar, dalla lunghezza d'onda e dalla geometria di acquisizione. Infine τ indica la costante di decorrelazione temporale, solitamente fissata a 30 giorni.

Una selezione non ottimale della primaria può avere un impatto negativo sulla qualità delle misurazioni InSAR, poiché tutti gli interferogrammi vengono generati da essa.

2.4.2 Co-registrazione

Tale fase prevede il ricampionamento di tutte le immagini secondarie sulla griglia dell'immagine primaria, al fine di garantire l'allineamento pixel per pixel ed è importante che sia accurato in modo che gli stessi bersagli al suolo contribuiscano allo stesso pixel in tutte le immagini del dataset. La co-registrazione deve compensare le differenze geometriche derivate dalle traiettorie orbitali non identiche e i diversi parametri del sensore, come la velocità e le frequenze di campionamento, anche se sono stati minimizzati grazie all'uso dei due satelliti Sentinel-1a e Sentinel-1b.

La fase prevede un campionamento iniziale 2D basato sui vettori di stato satellitari della primaria e secondaria e l'utilizzo di un Modello Digitale dell'Elevazione (DEM) per stimare i parametri di campionamento attraverso un'analisi della correlazione incrociata locale. Per garantire un'accuratezza di co-registrazione dell'azimut migliore di 0,001 pixel, viene utilizzata una tecnica integrata nelle applicazioni InSAR, la Enhanced Spectral Diversity (ESD).

2.4.3 Interferogrammi differenziali

Come descritto precedentemente, un interferogramma è il risultato di un confronto tra le fasi di due immagini SAR acquisite in momenti diversi e/o da differente posizione, ottenendo variazioni di fase dovute alla topografia, al movimento del terreno, agli effetti atmosferici ed al rumore (Figura 2.4.3.1).

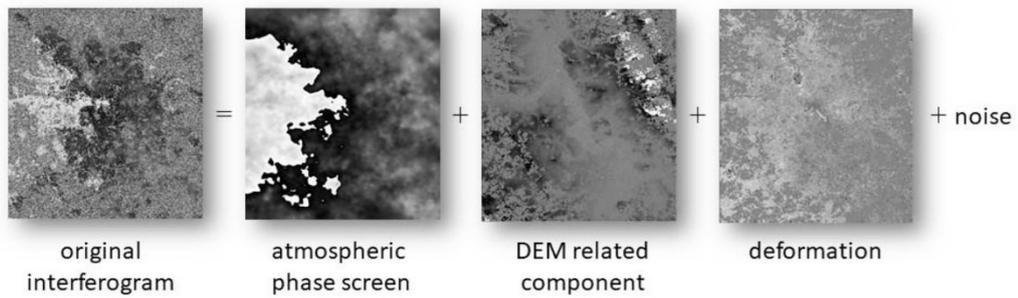


Fig. 2.4.3.1 Diversi contributi di fase che originano l'interferogramma originale (Ferretti et al., 2023)

Per monitorare la deformazione del terreno, la tecnica multi-interferogramma deve identificare i pixel caratterizzati da un elevato rapporto segnale-rumore, stimare e rimuovere gli effetti atmosferici e considerare gli spostamenti locali compensando gli effetti topografici. Grazie all'utilizzo di un Modello Digitale di Elevazione (DEM) e dei vettori di stato del satellite è possibile calcolare e rimuovere la componente topografica, ottenendo un'interferogramma "sintetico". Con quest'ultimo viene sottratto dall'interferogramma originale e si ottiene un interferogramma differenziale, dove sono visibili i contributi atmosferici e le possibili componenti di fase dovute alla deformazione di superficie (Figura 2.4.3.2).

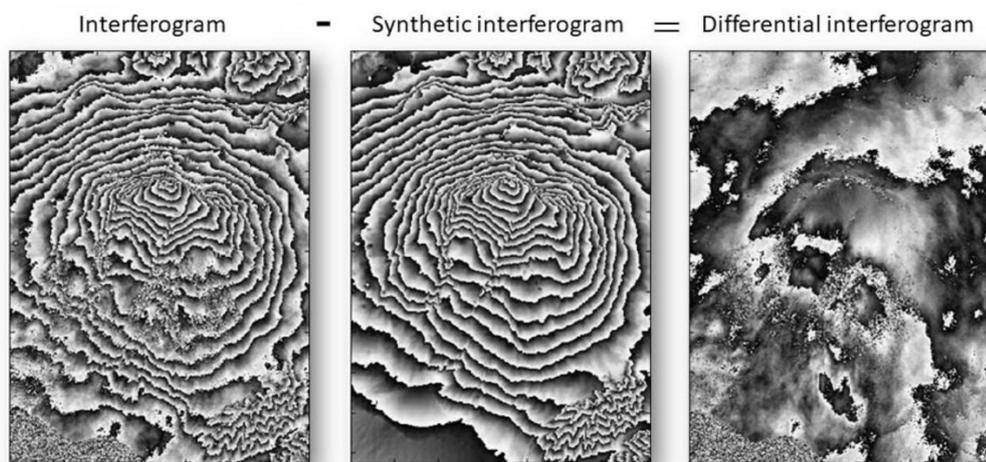


Fig. 2.4.3.2 Interferogramma differenziale ricavato dalla differenza fra l'interferogramma originale e quello sintetico (Ferretti et al., 2023)

2.4.4 Selezione degli MP

Concluso il lavoro degli interferogrammi differenziali, gli Enti di elaborazione identificano una serie di candidati dei punti di misurazione (MPC, Measurement Points Candidates) con coerenza elevata, utilizzando degli stimatori e puntando ad una scelta migliore per avere una maggiore probabilità di una stima efficace dei componenti atmosferici.

Le due categorie di stimatori sono degli algoritmi basati sull'ampiezza e sulla fase. I primi utilizzano l'indice di dispersione dell'ampiezza (DA, Amplitude Dispersion Index) come parametro per la stabilità della fase ed i punti con valori di DA bassi indicano elevata coerenza, quindi buoni candidati degli MP. I secondi, invece, analizzano mappe di coerenza spaziale o temporale, calcolando la media delle mappe di coerenza e i pixel che superano una determinata soglia vengono considerati come dei candidati dei punti di misurazione.

Si deve precisare che la selezione degli MP si basa su due principali categorie di scatterers:

- Persistent Scatterers (PS) sono dei riflettori puntuali con elevata coerenza temporale e geometrica che riflettono il segnale radar in modo costante nel tempo. Ad esempio, gli oggetti artificiali o le rocce esposte ed essi presentano un'ampia dispersione di ampiezza ed alta stabilità di fase. Sono utili in aree urbane o in luoghi con infrastrutture dense.
- Distributed Scatterers (DS) sono delle zone distribuite caratterizzate da omogeneità elettromagnetica e non mostrano un'elevata coerenza individualmente, ma il loro comportamento collettivo permette delle analisi affidabili. Sono tipici degli ambienti naturali come terreni agricoli, deserti o aree con vegetazione bassa. Essi permettono di coprire aree dove i PS sono rari ed aumentano la densità dei punti di misurazione.

La differenza si comprende meglio attraverso l'illustrazione riportata qui sotto (Figura 2.4.4.1)

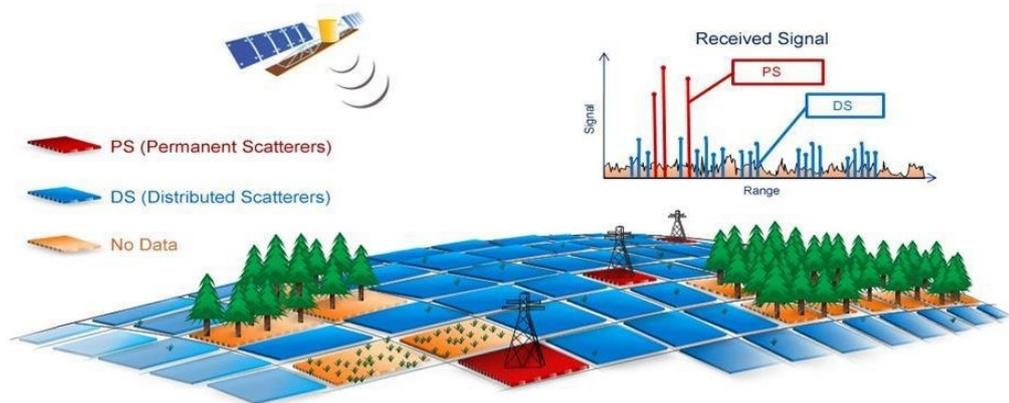


Fig. 2.4.4.1 Permanent Scatterer e Distributed Scatterer (Ferretti et al., 2023)

I PS forti possono generare artefatti, *sidelobe*, che influenzano i pixel vicini ed esistono delle tecniche di riduzione dei lobi laterali che servono a moderare l'impatto di risposte false generate dai lobi laterali, che possono influenzare negativamente la selezione degli MP. Una di queste prevede l'analisi del rapporto tra il segnale utile ed il disturbo circostante (Figura 2.4.4.2).

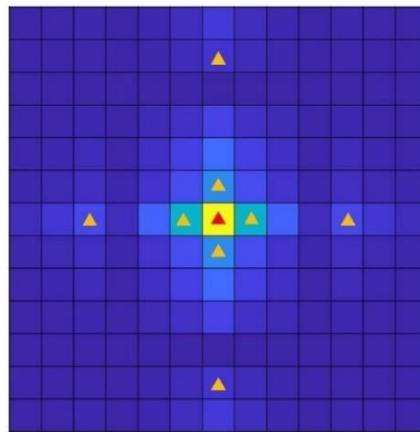


Fig. 2.4.4.2 Un singolo PS (triangolo rosso) può creare molti altri PS (triangoli arancioni) a seconda del valore del rapporto segnale-rumore (Ferretti et al., 2023)

2.4.5 Fase di scarto

La fase di scarto si applica per stimare le variazioni di fase su una griglia di candidati PS, considerando tutte le immagini disponibili per ottenere un modello coerente di cambiamenti di fase. Solitamente, viene utilizzato un modello a velocità costante per descrivere tali variazioni tra pixel adiacenti, eliminando le componenti atmosferiche simili nella differenza di fase. Il passaggio può essere rappresentato nella seguente equazione:

$$\varphi_i(P) - \varphi_i(P_c) \approx \frac{4\pi}{\lambda} B_t^i \cdot v + C_z^i \cdot \varepsilon_z = \widehat{\Delta\varphi}_1 \quad i = 1 \dots N$$

Dove B_t^i rappresenta la baseline temporale, v la velocità di spostamento e ε_z l'errore del DEM. Poiché i valori di fase sono coperti (*wrapped*), l'errore del DEM ed il tasso di spostamento sono stimati massimizzando la coerenza temporale:

$$\max_{v,\varepsilon} \left| \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N e^{j(\Delta\varphi_i - \widehat{\Delta\varphi}_i)} \right|$$

In questo modo, i dati di fase sono stati scartati, sfruttando i valori stimati della velocità relativa e dell'elevazione relativa tra coppie di diffusori ad alta coerenza (MPC), connessi tramite una rete di archi ponderati in base alla coerenza temporale (Figura 2.4.5.1).

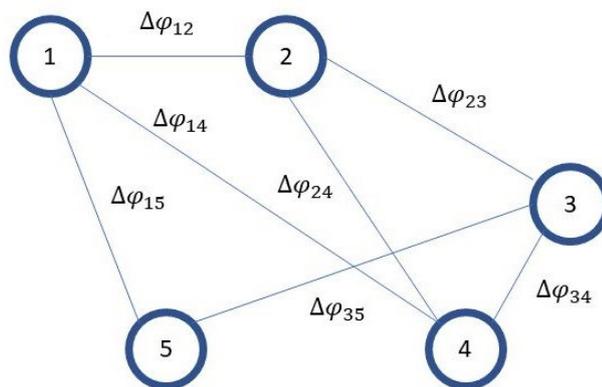


Fig. 2.4.5.1 I collegamenti rappresentano le differenze di fase (Ferretti et al., 2023)

L'approccio descritto prima è in grado di gestire movimenti non uniformi, purché la componente non lineare dello spostamento non alteri il conteggio del numero di cicli di fase da aggiungere ai valori wrapped. Il sistema EGMS adotta un approccio lineare per lo scarto ed il metodo può fornire stime corrette anche in presenza di punti affetti da comportamento non lineare.

La fase di unwrapping è la fase di elaborazione più impegnativa in tutto il procedimento di analisi InSAR.

2.4.6 Elaborazione atmosferica

La propagazione del segnale radar è influenzata dai fenomeni atmosferici nell'ionosfera e nella troposfera, generando ritardi aggiuntivi (*extra-delay*). Tali effetti sono rappresentati dall'Atmospheric Phase Screen (APS), associato a ciascuna acquisizione SAR. Le principali cause dei disturbi atmosferici sono: gli effetti ionosferici che sono importanti per il radar a bassa frequenza, ma meno rilevanti per i sensori in banda X o C nelle analisi InSAR, la turbolenza atmosferica (*wet delay*) in cui le variazioni di densità del vapore acqueo possono modificare la velocità di propagazione del segnale, generando artefatti di fase, infine la stratificazione atmosferica (*dry delay*), cioè la stratificazione verticale dell'atmosfera in strati di differenti velocità di propagazione causa ritardi atmosferici aggiuntivi, specialmente nelle zone montuose, correlati alla topografia locale.

Una volta scartate le fasi, è possibile stimare e rimuovere le componenti atmosferiche, sfruttando la loro descrizione statistica e considerando dei modelli adeguati. Il moto di ciascun punto è modellato come un polinomio di basso ordine con una componente stagionale, mentre i residui delle fasi, rispetto al modello stimato, sono interpolati e filtrati passa-basso nello spazio e passa-alto nel tempo. Da tale procedura di filtraggio, ci si aspetta che siano correlati nello spazio, ma non correlati nel tempo, data la rapida variabilità delle condizioni atmosferiche. Dopo il filtraggio, il modello tiene conto della topografia locale e delle correlazioni spaziali utilizzando variogrammi specifici.

Sebbene non siano ancora integrati nei prodotti EGMS, i modelli meteorologici numerici (Numerical Weather Models, NWM) offrono una risoluzione spaziale di

3 km ed un campionamento temporale di 6 ore. L'uso di tale fonte d informazioni può aiutare a rimuovere componenti atmosferiche a bassa frequenza, ma ha un impatto limitato sugli effetti locali.

2.4.7 Generazione delle serie temporali di spostamento per ciascun MP

Dopo che gli interferogrammi sono stati compensati per i disturbi atmosferici, l'algoritmo procede con un'analisi pixel per pixel da cui estrarre informazioni affidabili sullo spostamento. Un PS è un pixel dell'immagine che ha una bassa dispersione di fase rispetto al modello di spostamento idoneo, dopo aver stimato la sua elevazione precisa. Purtroppo non tutti gli interferogrammi vengono scartati, quindi tale operazione viene effettuata su una griglia di PS sparsa al fine di generare i risultati finali ed efficaci.

Il pixel P viene identificato come PS ogni volta che la sua coerenza temporale supera una certa soglia:

$$\gamma_t(P) = \max_p \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{j\phi_{ci}(P)} e^{-jm_i(p)} \right|$$

dove $\phi_{ci}(P)$ sono le fasi interferometriche compensate per gli effetti atmosferici e m è il modello parametrico. La soglia per identificare i PS viene fissata sulla base di una simulazione Monte Carlo, minimizzando il tasso di falsi positivi, che tipicamente è inferiore a 10^{-5} .

Una volta scartati i dati, è semplice modificare il riferimento temporale impostando le serie temporali come se fossero riferite ad una scena primaria, alla prima acquisizione del dataset o ad un riferimento virtuale, aggiungendo un offset (Figura 2.4.7.1).

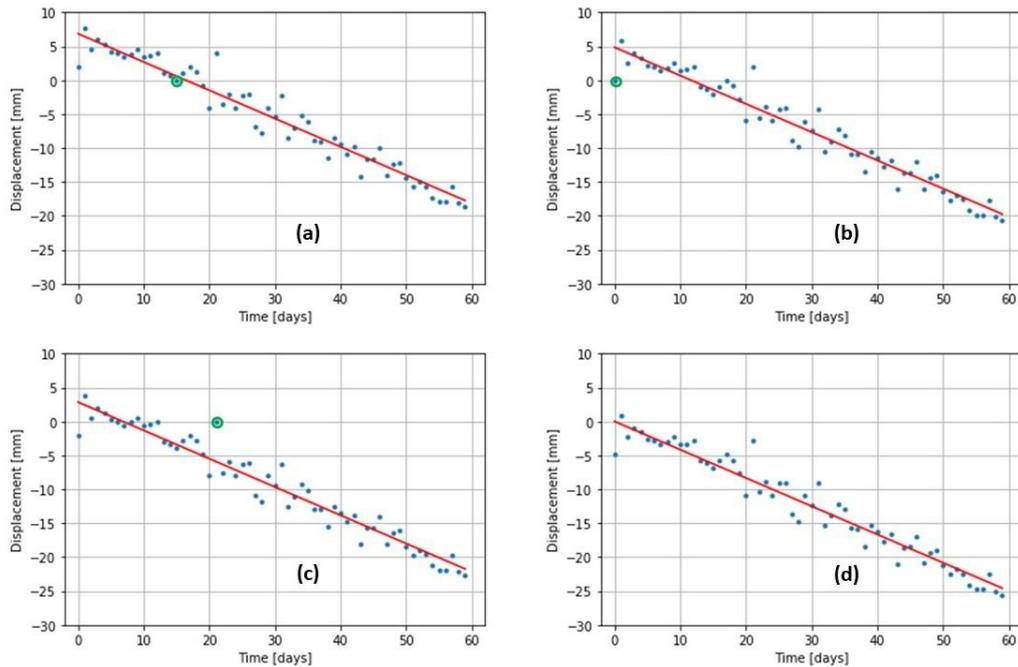


Fig. 2.4.7.1 Diversi punti di riferimento temporale. La serie temporale può essere riferita all'immagine primaria, cerchiata in verde (a); alla prima immagine nel set di dati, cerchiata in verde (b); ad una qualsiasi immagine di rumore, cerchiata in verde (c); o all'origine del modello montato, linea rossa (d)
(Ferretti et al., 2023)

In maniera analoga alla costruzione di un “riferimento temporale virtuale”, si può adottare un approccio simile per selezionare un punto di riferimento spaziale “virtuale”, ossia il valore medio dell'intero dataset, anziché selezionare un punto fisico. Tale adozione riduce l'impatto di rumori e spostamenti sui risultati finali, aumentando il rapporto segnale-rumore (SNR) medio delle serie temporali generate (Figura 2.4.7.2).

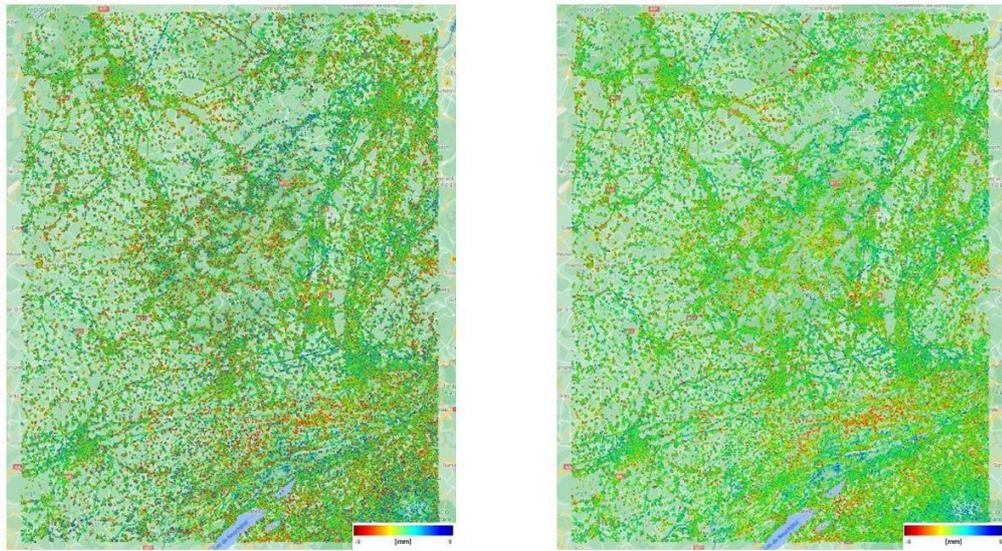


Fig. 2.4.7.2 Stesso grafico, ma con un approccio di riferimento standard a sx e un approccio di riferimento del Servizio EGMS a dx che mostra un livello SNR più elevato (Ferretti et al., 2023)

2.4.8 Geocodifica

Il processo di geolocalizzazione prevede il calcolo delle coordinate geografiche di tutti gli MP, cioè di tutti i pixel dell'immagine ed è essenziale per mappare accuratamente i dati radar su un sistema di coordinate geografiche standard. Il passaggio consiste nell'assegnare delle coordinate geografiche basandosi sui dati orbitali dell'immagine primaria, sulle coordinate in gamma ed azimuth degli MP e sull'elevazione degli MP. Il risultato finale include delle coordinate geografiche di ciascun MP, delle proiezioni in Easting, Northing ed altezza in qualsiasi sistema di coordinate e l'altezza ellissoidale e ortometrica degli MP.

Diversi errori influenzano la geolocalizzazione come gli errori sistematici e quelli individuali, mentre i primi sono delle deviazioni comuni per tutti gli MP, come imprecisioni nei vettori orbitali o nella sincronizzazione temporale e possono essere risolti con un allineamento manuale, i secondi sono delle deviazioni specifiche per ogni MP, legate all'incertezza nell'elevazione del bersaglio ed alla risoluzione spaziale del sensore radar.

2.4.9 Risultati

I risultati generati da un'analisi interferometrica dei PS su un dataset multitemporale di immagini SAR comprendono l'identificazione dei punti di misura geolocalizzati con coordinate di latitudine, longitudine ed altezza e la stima delle variazioni di distanza rispetto alla linea di vista del radar nel tempo, attraverso le serie temporali per ogni MP. Sono riportati anche i parametri dipendenti dal modello utilizzato nell'elaborazione, come la velocità media, l'accelerazione, l'ampiezza delle componenti stagionali e le corrispettive deviazioni standard e le metainformazioni che riguardano la geometria di acquisizione, il dataset ed i sensori radar utilizzati.

E qui si concludono le principali operazioni di un generico processore multi-interferogramma InSAR.

3. EGMS

Uno dei servizi che interessa di più per il nostro lavoro è quello riguardante il territorio, denominato Servizio di Monitoraggio del Territorio di Copernicus (Copernicus Land Monitoring Service). Esso offre una visuale sulla copertura del suolo e relativi cambiamenti, sull'utilizzo del suolo e su altre caratteristiche. Attraverso la piattaforma del CLMS è possibile accedere anche ad un importante prodotto, il CORINE (Coordination of Information on the Environment) Land Cover (CLC), principale fonte di dati spaziali sulla copertura del suolo nel territorio europeo.

Nello specifico, l'idea di realizzare un servizio più approfondito che mira all'osservazione del suolo ha origine dalla necessità di possedere dei dati precisi e tempestivi sui movimenti della Terra, validi per gestire fenomeni geologici come le frane ed i terremoti, creare delle misure di prevenzione e produrre delle mappe di suscettibilità. Tutto ciò è possibile grazie alla tecnologia radar contenente nei satelliti Sentinel-1.

Nel Novembre del 2016 è iniziata la fase di definizione del servizio EGMS, European Ground Motion Service, che mira a fornire dati InSAR (Sintetic Aperture Radar Interferometry) sulla misurazione e rilevamento dello spostamento del suolo derivanti dal Satellite Sentinel-1. Dall'acronimo si evince che è un servizio europeo che ha coinvolto gli Stati partecipanti a Copernicus, un programma di osservazione della sfera terrestre dell'Unione Europea (Figura 3.1). Questi Paesi includono: Austria, Belgio, Bulgaria, Croazia, Cipro, Danimarca, Estonia, Finlandia, Francia, Germania, Irlanda, Italia, Lettonia, Lituania, Lussemburgo, Malta, Paesi Bassi, Polonia, Portogallo, Repubblica Ceca, Romania, Slovacchia, Slovenia, Spagna, Svezia ed Ungheria. Altri Paesi che partecipano attivamente al programma sono la Norvegia, l'Islanda ed il Regno Unito.



Fig. 3.1 Stati membri partecipanti al Servizio EGMS (Kotzerke et al., 2022)

L'EGMS rappresenta l'ultimo e recente servizio del Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) ed è un portale gratuito ed accessibile a tutti gli utenti che hanno bisogno di usufruire dei dati sugli spostamenti dei terreni, delle strutture ed infrastrutture per comprendere la dinamicità della Terra e possono essere applicate su scala locale, regionale o nazionale.

Il servizio si serve di informazioni che vengono raccolte ed analizzate attraverso l'interferometria multitemporale delle immagini radar ad apertura sintetica Sentinel-1. Le misurazioni del movimento con precisione millimetrica sono possibili grazie al calcolo della distanza tra i Persistent Scatterers (PS), oggetti del terreno che agiscono come dei riflettori radar stabili viste dal satellite, e la piattaforma stessa. Essi sono stabili rispetto alla modalità di riflessione e alla fase. I PS corrispondono ad elementi artificiali (come edifici, tralicci, linee ferroviarie, strade, etc) o naturali (accumuli di detrito, affioramenti rocciosi, falde detritiche, etc) già presenti sul terreno e si distinguono per il fatto di possedere un'elevata stabilità nel tempo della risposta elettromagnetica, la cosiddetta "firma radar".

Il sistema funziona nel seguente modo: il sensore radar invia un impulso elettromagnetico verso la superficie terrestre e gli elementi a terra riflettono il segnale, di cui una parte arriva al satellite. Il sistema è in grado di determinare la distanza che intercorre tra il sensore ed il bersaglio, misurando il tempo trascorso tra l'invio dell'impulso e la ricezione del segnale retrodiffuso. Se il bersaglio si trova in un'area affetta da fenomeni di dissesto, il sensore rileva tra un'acquisizione e l'altra una variazione della distanza sensore-bersaglio lungo la LOS e, quindi, lo spostamento dell'oggetto in questione, come mostrato nella Figura 3.2.

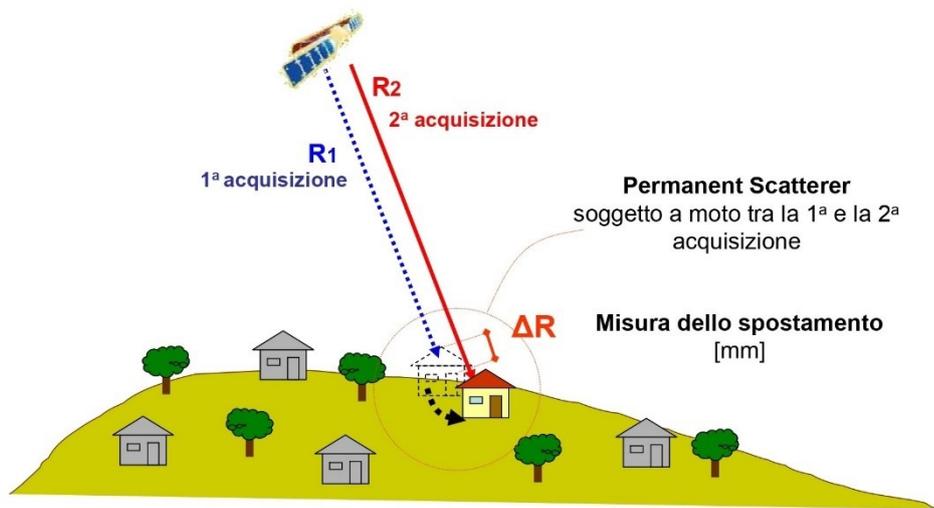


Fig. 3.2 Principio di funzionamento della tecnica InSAR

La distribuzione dei PS sull'area varia in base all'uso del suolo ed alla topografia della superficie investigata. Un esempio: in un'area urbana si possono individuare un numero elevato di punti di misurazione InSAR rispetto ad un'area di campagna. Infatti i terreni scoscesi e rocciosi che caratterizzano i terreni di montagna sono degli ottimi riflettori naturali e per questo in queste aree il numero di PS aumenta e di conseguenza aumenta anche la densità dei punti di misurazione.

Purtroppo la presenza del manto nevoso rappresenta un'entità di disturbo durante la tecnica di lavorazione ed analisi, perciò vengono esclusi i periodi caratterizzati da innevamento dalle serie storiche.

Tali dati si presentano sotto forma di mappe omogenee codificate a colori in base ai diversi valori di velocità di spostamento del suolo, espressi in millimetri all'anno (Figura

3.3).

Per logica, la leggenda viene espressa nel seguente modo:

- I punti verdi indicano i PS che mostrano un minimo o nessun movimento
- I punti tendenti al rosso rappresentano i PS che si stanno allontanando dal satellite
- I punti tendenti al blu, invece, sono i PS che si muovono in direzione del satellite

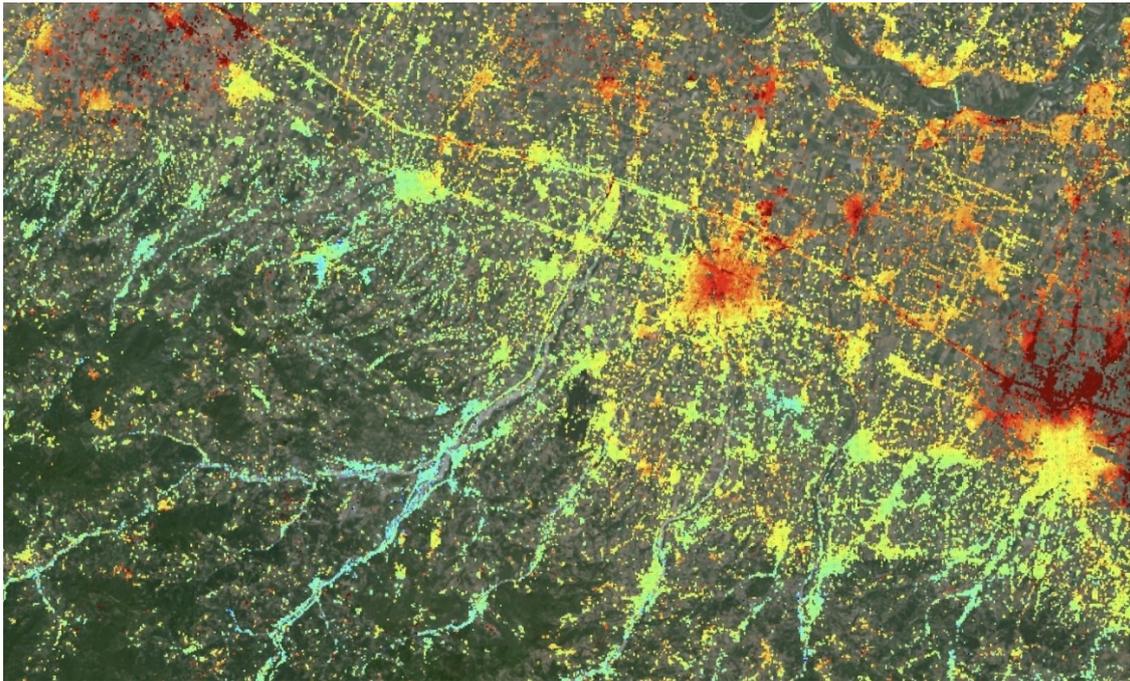


Fig. 3.3 Esempio di visualizzazione dei PS in base ai valori di velocità sulla città di Parma

Ognuno di questi punti di misurazione include un grafico della serie temporale del movimento per tutta la durata dell'analisi, dando la possibilità di comprendere l'evoluzione temporale di qualsiasi spostamento. A seconda della direzione che si vede nel grafico, cambia anche il tipo di interpretazione del suolo. Nelle figure sottostanti sono riportati diversi casi:

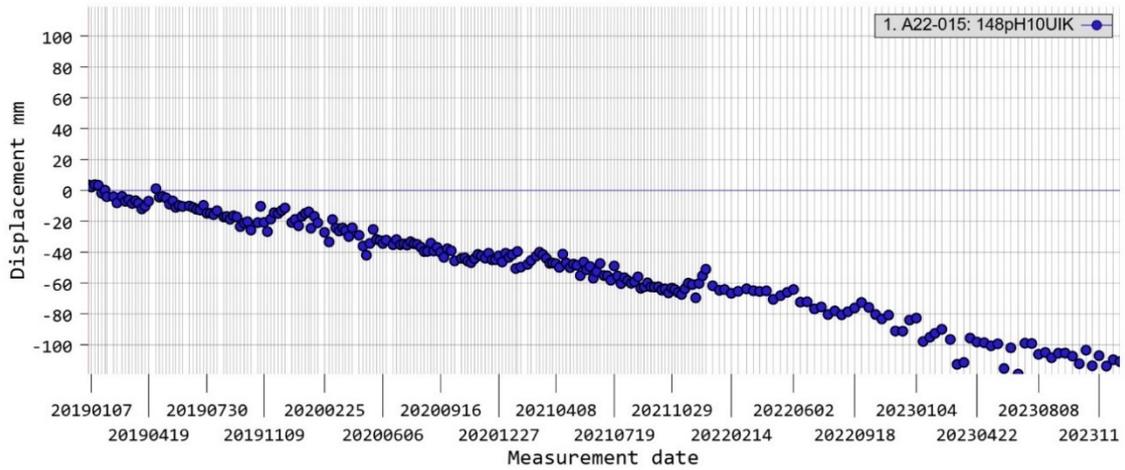


Fig. 3.4 Esempio di serie temporale che mostra come il suolo si sta allontanando dall'antenna

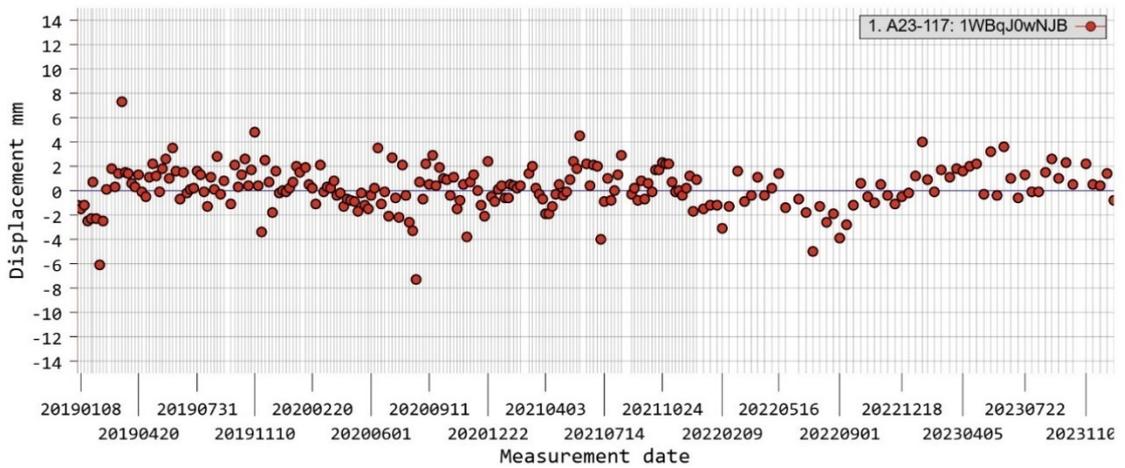


Fig. 3.5 Esempio di un punto del terreno stabile

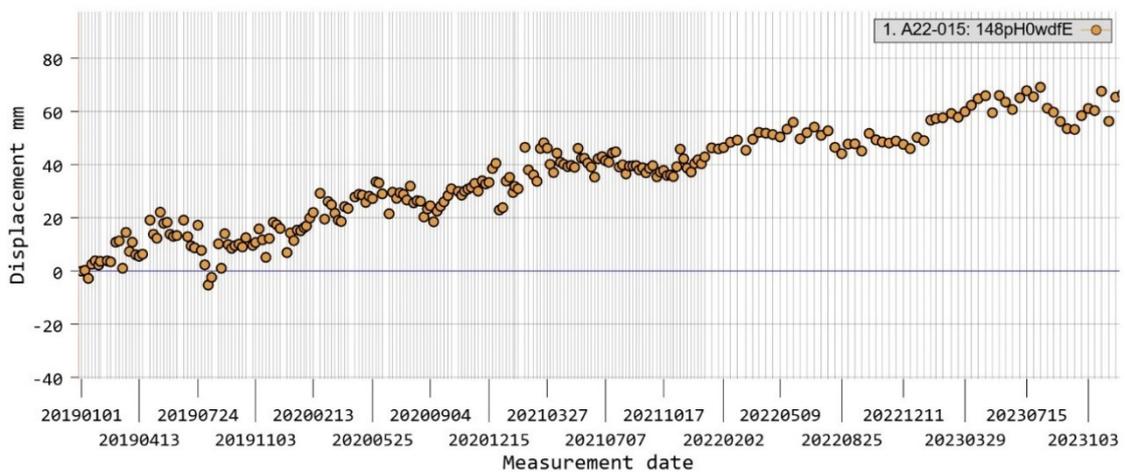


Fig. 3.6 Esempio di serie temporale che mostra l'avvicinarsi del suolo in direzione dell'antenna

Semplificando, le informazioni basilari associate ai punti di misurazione sono le coordinate spaziali, associate alla posizione del bersaglio a terra; la velocità media annua di spostamento e la serie storica di spostamento.

3.1 Prodotti

Il servizio mette a disposizione tre principali prodotti InSAR che permettono all'utente di visualizzare, scaricare i dati per l'analisi ed interpretarli. Il loro utilizzo cambia a seconda dello scopo di lavoro, della professionalità dell'utente e della sua maneggevolezza. Di seguito vengono descritti i dettagli e le caratteristiche per ciascun prodotto.

3.1.1 Prodotto EGMS Base

Il prodotto Base offre delle informazioni basilari sull'andamento del suolo terrestre. Sfrutta il metodo interferometrico SAR per rilevare movimenti lenti ed a lungo termine, ed è idoneo per identificare fenomeni di frane, subsidenza e deformazioni geologiche di grande portata. Tale prodotto include solo i punti più stabili, cioè quelli con una riflettività radar costante, come ad esempio gli affioramenti rocciosi o le strutture artificiali.

I punti di misurazione InSAR vengono presentati in una mappa 2D, ciascuno con colori diversi a seconda del valore della velocità media per un determinato periodo di tempo. A ciascun punto è associato un grafico di una serie temporale, derivata da un'analisi statistica del set di dati. Tali dati vengono forniti nella linea di vista del satellite, cioè lo spostamento verticale viene ricavato dalle continue proiezioni delle misurazioni tra satellite e bersaglio lungo una linea immaginaria.

Poiché il satellite percorre due traiettorie diverse, grazie a questa modalità vengono presentati due set di dati diversi: uno costituito da dati SAR acquisiti lungo la direzione ascendente (da sud a nord), mentre l'altro presenta dati SAR derivanti dalla direzione discendente (da nord a sud).

Rappresenta un primo passo ed un input per la realizzazione del prodotto Calibrato più avanzato.

3.1.2 Prodotto EGMS Calibrato

È considerato il preferito dagli utenti che utilizzano il servizio, perché soddisfa i loro standard. Tale prodotto è proprio la copia del Base, ma ottimizzato dai valori di spostamento InSAR di ogni punto di misurazione riferiti al modello originato dai dati delle serie temporali GNSS (acronimo di Global Navigation Satellite System). In questo modo le misurazioni risulteranno assolute, grazie all'elevata precisione nella determinazione della posizione, alla disponibilità continua ed alla copertura globale.

Anche questo prodotto viene fornito come due set di dati distinti a seconda della direzione discendente od ascendente.

3.1.3 Prodotto EGMS Ortho

Sono necessari i prodotti Calibrati con geometria ascendente e discendente per la realizzazione del prodotto Ortho. In alcune aree ad alto rilievo topografico non c'è una copertura del 100%, a causa delle ombre, scorci o altri comuni artefatti geometrici associati al telerilevamento radar.

Dato che i prodotti Calibrati ascendenti e discendenti che compongono il prodotto Ortho hanno geometrie di acquisizione diverse, cioè tra i due set di dati si nota una differenza della distribuzione dei punti di misurazione, è necessario mediare i dati su una griglia comune di 100 m, in modo che i set di dati possano rappresentare la stessa area di terreno. La misura di 100 m viene scelta per coincidere con gli altri servizi Copernicus e risulta idonea per un buon compromesso tra risoluzione e copertura spaziale del database.

Un'altra caratteristica che differenzia i due prodotti sono i modelli di acquisizione spostati nel tempo in base al tracciato, per questo motivo il campionamento temporale delle tracce satellitari risulta non allineato. Così come è stata fatta per la griglia spaziale, si definisce una griglia temporale comune, definendo un intervallo di tempo, da Gennaio 2016 a Dicembre 2021, come baseline delle serie temporali, con un campionamento temporale regolare di sei giorni.

Dal prodotto Calibrato vengono sfruttati gli angoli di visione per ottenere due ulteriori livelli: uno di spostamenti in direzione puramente verticale, l'altro di spostamenti puramente orizzontali.

Il prodotto Ortho ha il vantaggio di essere facile da comprendere per chi non ha una buona conoscenza dell'interferometria SAR, grazie alla rappresentazione del movimento della superficie in un sistema di coordinate standard, quindi la geometria di acquisizione dei dati non è essenziale. Allo stesso tempo risulta essere preziosa per gli esperti la scomposizione dei dati per comprendere meglio i fenomeni di tettonica o di dissesti con gli spostamenti Est - Ovest, oltre a quelli verticali.

Ci sono delle aberrazioni quando il rilevamento è polare come nei satelliti Sentinel-1. Essi infatti hanno delle anomalie di trasmissione delle immagini compatibili con la direzione della rotta in concomitanza con la stessa direzione del rilevamento. Le componenti verticale ed orizzontale vengono stimate grazie ad un'interpolazione spaziale delle informazioni disponibili, con un metodo diverso, che è il GNSS, poiché tale sistema è dotato di dati con una risoluzione spaziale molto inferiore rispetto alle misurazioni InSAR.

I prodotti Base e Calibrato sono dati vettoriali, per cui la scelta di proiezione non condiziona la qualità del prodotto. Ad ogni modo, viene utilizzata la griglia europea ETRS89-LAEA, modello basato sul sistema di riferimento di coordinate di proiezione Lambert Azimuthal Equal Area, come proiezione uniforme. Sono riportati anche le coordinate geografiche per i punti di misurazione, utilizzando il sistema geodetico WGS84.

Il prodotto Ortho, invece, è sotto forma di raster, perciò ogni cella appartenente ad una griglia di 100 m dipende dalla proiezione e dal sistema geodetico scelti. Ciò vuol dire che se si vuole riproiettare, devono essere ricampionati e di conseguenza possono presentare delle possibili distorsioni geometriche.

Il modello A-EPND (Augmented EPN Densification) è un modello di riferimento che viene utilizzato per generare i prodotti Calibrato ed Ortho. Esso viene costruito utilizzando i dati GNSS con l'EUREF Densification (EPND) come fonte principale. I dati GNSS danno informazioni generali su come si muove il terreno su larga scala, i dati InSAR riempiono i dettagli sui minimi movimenti, anche su piccola scala, con una maggiore densità dei punti, grazie alla loro alta risoluzione. Grazie a questi punti di forza, vengono combinati fra di loro per generare il modello di riferimento che contiene velocità

medie in 3D (est, nord e verticale) su una griglia con celle di 50 km ed avere una visione complessiva della velocità di spostamento del suolo.

Quando si lavora ad un progetto, vengono scaricati tantissimi dati e per evitare di fare confusione, si presta attenzione alle diverse diciture che presentano diversi file. La cosa fondamentale da leggere è capire con quale prodotto si sta lavorando, grazie a dei codici di riferimento: il prodotto Base è indicato con il codice L2a, mentre quello Calibrato è L2b, l'Orto, invece, è segnalato con la sigla L3.

3.2 Attributi

Una varietà di attributi, cioè dei campi dati, viene fornita insieme ai prodotti. Tali informazioni sono fondamentali per comprendere ed analizzare in dettaglio i prodotti e valutare la loro qualità e le loro incertezze.

Per i prodotti Base e Calibrato gli attributi non cambiano a seconda che le geometrie siano ascendenti o discendenti, mentre per gli Ortho non si applica questo criterio, perché vengono realizzati dalla scomposizione di entrambe le geometrie.

In questa sezione vengono riportati dei campi dati, specificando i loro significati e come vengono utilizzati.

Il tipo di punto di misurazione (*mp_type*) categorizza i punti di misurazione secondo il modello di riflettore che ha generato il segnale radar utilizzato per monitorare i movimenti del terreno. Il valore 0 corrisponde al Permanent Scatterer, riflettori permanenti sul suolo che riflettono i segnali radar coerentemente nel tempo, caratterizzati da una stabilità costante. Se il valore è maggiore di 0, allora si tratta di Distributed Scatterer, riflettori distribuiti associati ad aree più estese con caratteristiche di riflessione congruenti, ma meno stabili rispetto ai primi. L'unità di misura dell'*mp_type* è il m².

La coerenza temporale (*temporal_coherence*) determina la stabilità delle proprietà di riflessione proveniente da un MP durante un certo tempo di osservazione. Tale dato fornisce valori compresi tra 0 e 1, dove il valore 0 rileva nessuna coerenza, a differenza del valore 1 che indica una maggiore affidabilità.

Il Root Mean Square Error (*rmse*) è l'acronimo italiano di "Errore Quadratico Medio". I risultati di suddetto dato permettono all'utente di interpretare sia la variazione nella serie storica in mm, sia la precisione delle misurazioni del movimento del terreno.

La velocità media (*mean_velocity*) viene calcolata insieme all'interazione con il Line of Sight del satellite. L'innalzamento di una data superficie fa avvicinare lo spostamento verso il satellite giustificando una misurazione positiva, mentre l'abbassamento induce l'allontanarsi dai sensori e quindi differisce valori negativi. Questa interpretazione è usata per i prodotti Base e Calibrato, come mostrato nell'esempio in Figura 3.2.1 realizzato nel promontorio di Almeñucar, in Spagna, dove si evidenzia il ruolo essenziale della geometria locale per la misurazione quando si realizza l'imagin nella direzione ascendente (a sinistra in Figura) e discendente (a destra in Figura).

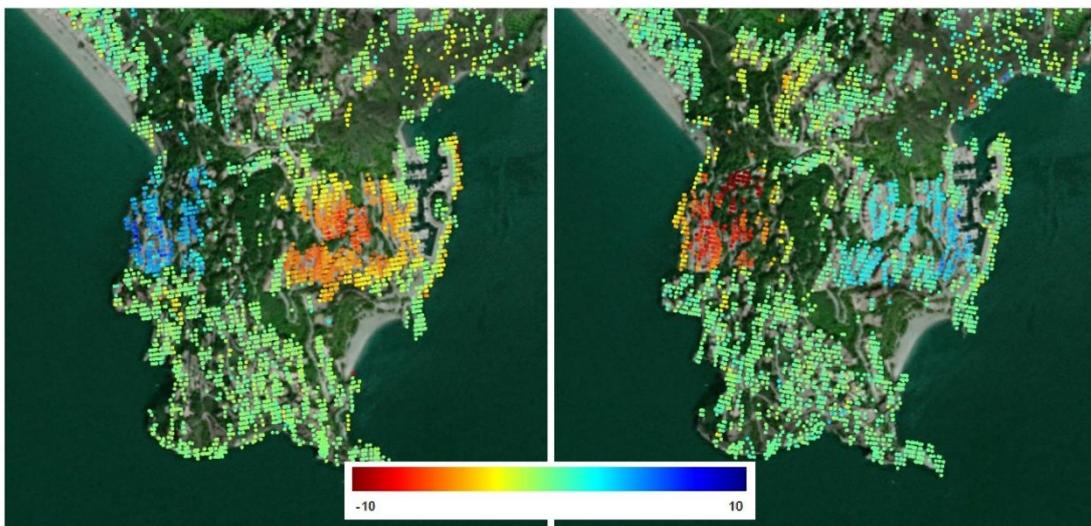


Fig. 3.2.1 Confronto tra ascendente (sx) e discendente (dx) del prodotto Base (Ferretti et al., 2023)

Con i prodotti Ortho si possono calcolare, oltre ai movimenti up - down, anche i movimenti est - ovest, sicuramente più indicativi per quanto riguarda lo spostamento laterale del terreno. La Figura 3.2.2 riporta un esempio dello stesso promontorio.

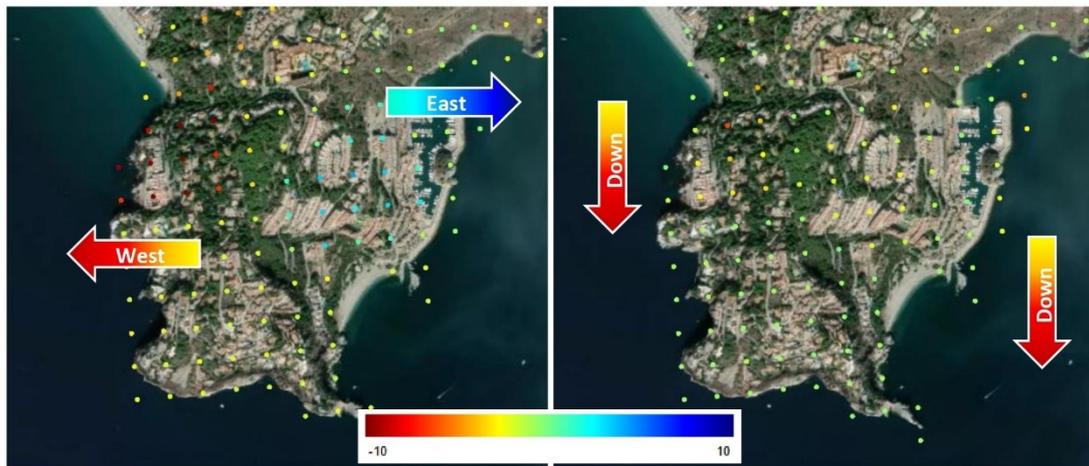


Fig. 3.2.2 Confronto tra Est - Ovest (sx) e Verticale (dx) del prodotto Ortho (Ferretti et al., 2023)

Un altro campo dati importante per l'analisi dei prodotti è la stagionalità (*seasonality*), intesa come l'oscillazione stagionale sinusoidale associata agli eventi ciclici nel corso dell'anno come precipitazioni e variazioni di temperature tra inverno ed estate. I valori che più si avvicinano alla realtà sono compresi tra 5 e 10 mm.

Infine, le serie temporali di un punto di misurazione permettono all'utente di interpretare tramite un grafico, rappresentante in ascisse il periodo di osservazione ed in ordinate lo spostamento del suolo, sempre con le stesse coordinate geografiche dello stesso identico punto. Nella Figura 3.2.3 viene riportato un esempio di serie temporale, avendo comunque la possibilità di poter impostare un range di valori diverso a seconda dello scopo.

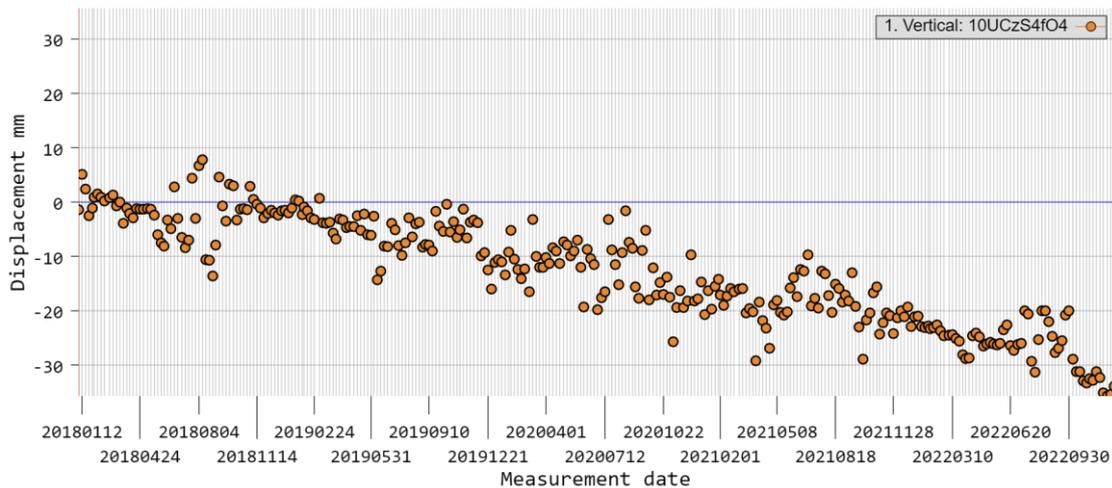


Fig. 3.2.3 Esempio di serie temporale di un MP

3.3 Aggiornamento dei dati

Dal punto di vista tecnico, una volta, era molto difficile aggiornare periodicamente i dati InSAR, perché non c'era un'organizzazione dei dati che potesse aiutare anche gli utenti meno esperti ad utilizzare tali dati. Con l'introduzione del servizio EGMS, è stato prodotto un set di dati e la strategia di aggiornamento è basata su quattro punti principali: semplicità, in modo che sia di facile utilizzo sia per gli esperti che non; continuità, cioè l'interazione con i dati aggiornati dev'essere il più simile possibile a quella utilizzata precedentemente; coerenza e gradualità, cioè non deve introdurre concetti complessi troppo presto, in modo da poter permettere alle persone di familiarizzare con tale servizio. Il primo aggiornamento è stato realizzato congelando le serie temporali ai valori di base, poi vengono considerate le immagini del 2021 insieme ad una serie di immagini degli ultimi anni della linea di base. Le nuove serie temporali vengono realizzate, integrando con quelle della linea di base ed infine diversi attributi, come la velocità, l'accelerazione e la stagionalità, vengono rivalutate sull'intera nuova serie temporale (Figura 3.3.1).

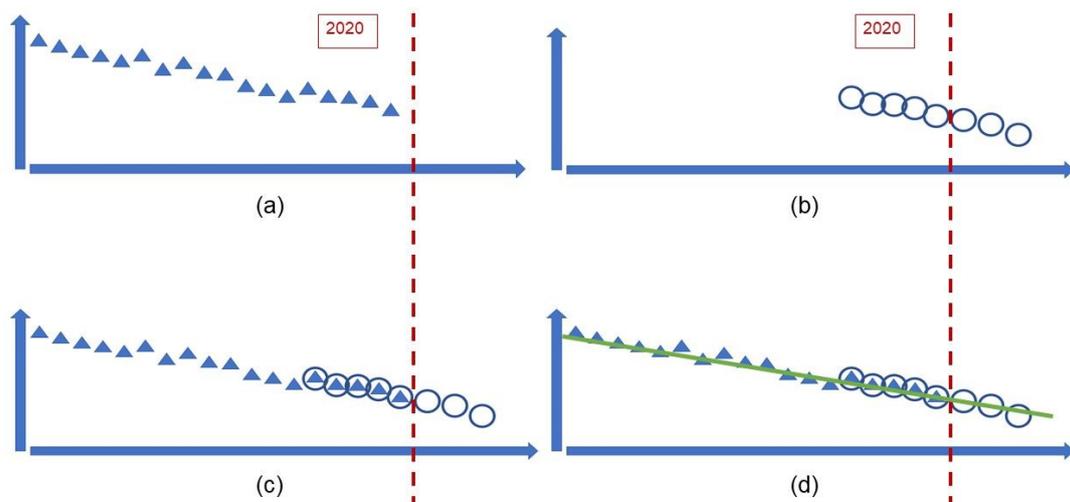


Fig. 3.3.1 Quattro fasi principali per la realizzazione della strategia di aggiornamento (Ferretti et al., 2023)

Dopo aver riscontrato grande successo nell'utilizzo della piattaforma da parte degli utenti, il servizio ha pensato di riprendere il primo aggiornamento e aggiungere alcuni punti per una seconda strategia di aggiornamento. Il servizio preferisce utilizzare le serie temporali più brevi, perché descrivono più in dettaglio le deformazioni recenti e di breve durata, mentre quelle lunghe tendono a formare grafici più stabili in tempi limitati. Si presta più attenzione all'identificazione dei nuovi punti di misurazione e a mantenere elevata la densità di tali punti.

Anche qui, la realizzazione della seconda strategia di aggiornamento segue gli stessi passaggi del primo (Figura 3.3.2).

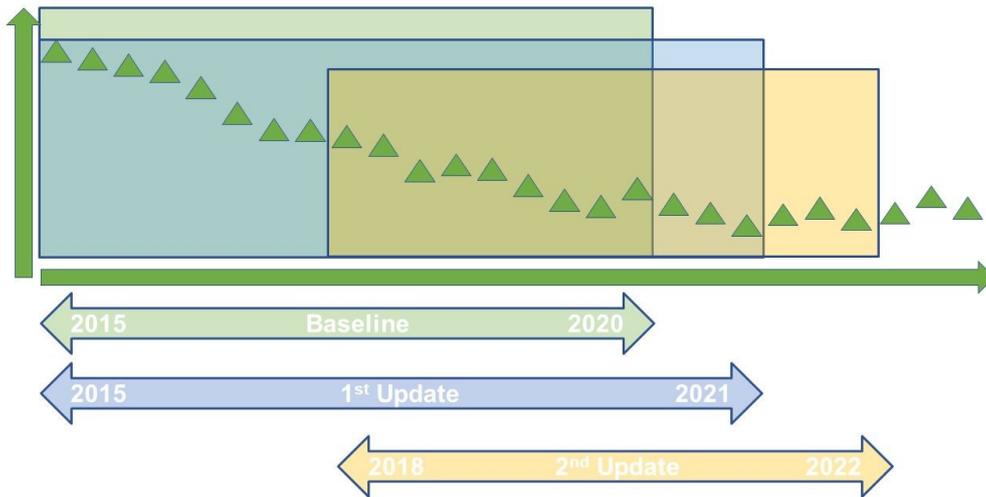


Fig. 3.3.2 Seconda strategia di aggiornamento (Ferretti et al., 2023)

Tra la necessità di ottenere nuove informazioni e la necessità di mantenere una continuità con il passato, è stato definito per i successivi aggiornamenti una finestra scorrevole di 5 anni, come mostrato nella Figura 3.3.3.

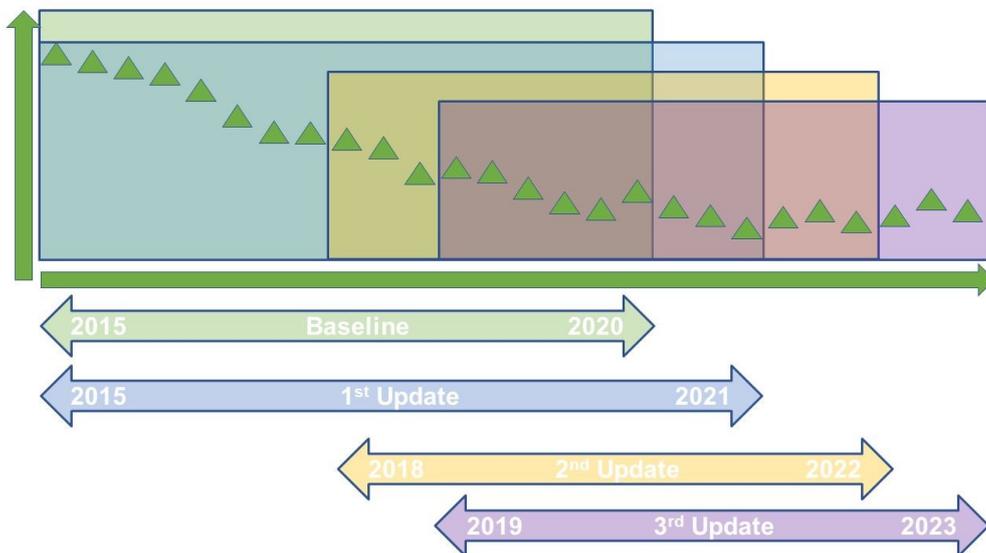


Fig. 3.3.3 Terza strategia di aggiornamento (Ferretti et al., 2023)

4. Inquadramento geografico dell'area

Per verificare l'affidabilità dei dati è necessario confrontare i dati EGMS con i dati forniti dalle Regioni all'interno dei loro Piani di Assesto Idrogeologico. In questi ultimi sono presenti anche dei layer che contengono poligoni associati alle zone interessate da frane. Come aree di studio sono state indicate la Regione del Veneto e la Regione della Toscana, individuando le zone maggiormente caratterizzate dai fenomeni di dissesto. Nella prima Regione, la Provincia di Belluno e il Bacino del Brenta - Bacchiglione sono state scelte come luoghi di riferimento.

4.1 Belluno

La Provincia di Belluno si trova nella parte settentrionale della Regione del Veneto, al di sotto delle Alpi Sud-Orientali (Figura 4.1.1).

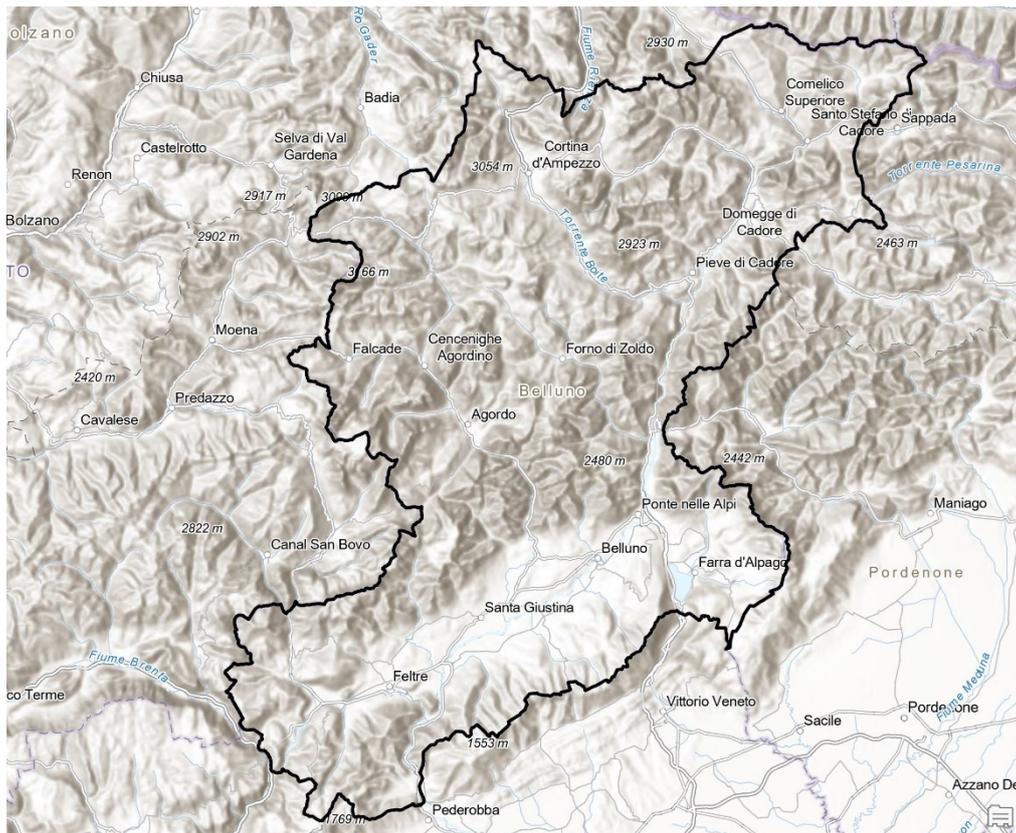


Fig. 4.1.1 Layer World Hillshade della Provincia di Belluno

Belluno è una Provincia tanto interessante quanto complessa dal punto di vista geologico a causa dell'elevata pendenza delle montagne. Essa, infatti, è collocata in una Regione contrassegnata da intense attività tettoniche dovute alla spinta da parte della placca africana contro quella eurasiatica, che ha creato le Alpi.

Le frane si verificano spesso lungo le pareti dolomitiche, difatti uno dei rischi geologici più significativi a Belluno sono le frane, causate dalle pendenze ripide delle montagne, dalla sua geografia montuosa e dalla loro composizione litologica, principalmente dolomie e calcari. Le stagioni delle piogge intense sono uno dei principali fattori che innescano tali fenomeni, oltre agli eventi sismici ed al processo di erosione naturale.

Gli scivolamenti delle rocce e dei detriti e i crolli delle pareti rocciose sono alcuni dei tipi di frane più comuni nell'area. I primi riguardano lo stacco dei massi e dei frammenti dai versanti, perché i versanti montuosi non riescono più a sostenere il loro peso, ed il loro scivolo verso il basso, a valle, interessando tutto ciò che incontra, come infrastrutture, strade ed abitazioni, coinvolgendo masse di terreno di varie dimensioni. I secondi, invece, descrivono come le pareti ripide e massicci dolomitici sono soggetti a crolli, particolarmente durante i periodi di gelo – disgelo, in quanto le variazioni di temperatura portano all'indebolimento delle strutture rocciose, o dall'erosione.

Nelle aree a maggiore pendenza, a causa delle piogge intense, fango e detriti si possono mobilitare, formando delle colate detritiche che scorrono verso valle e possono interessare terreni agricoli, strade e centri abitati.

Riassumendo, i dissesti sopracitati sono particolarmente frequenti nelle stagioni autunnali e primaverili, quando sono intense le precipitazioni o è rapido il disgelo invernale e tutto ciò porta all'aumento dell'instabilità dei versanti.

Val di Zoldo e Val di Cadore, ad esempio, sono aree particolarmente vulnerabili dato che presentano pareti dolomitiche ripide e versanti a forte pendenza. Anche Monte Schiara è un altro esempio di un'area a maggiore rischio, in quanto è una zona montuosa con fianchi ripidi costituiti da rocce friabili, che tendono a portare a frequenti crolli di rocce e scivolamenti.

Belluno presenta una complessa orografia che presenta una forte variazione altimetrica da circa 170 m slm fino a raggiungere i 3333 m slm, come si può evidenziare dalla Figura 4.1.2.

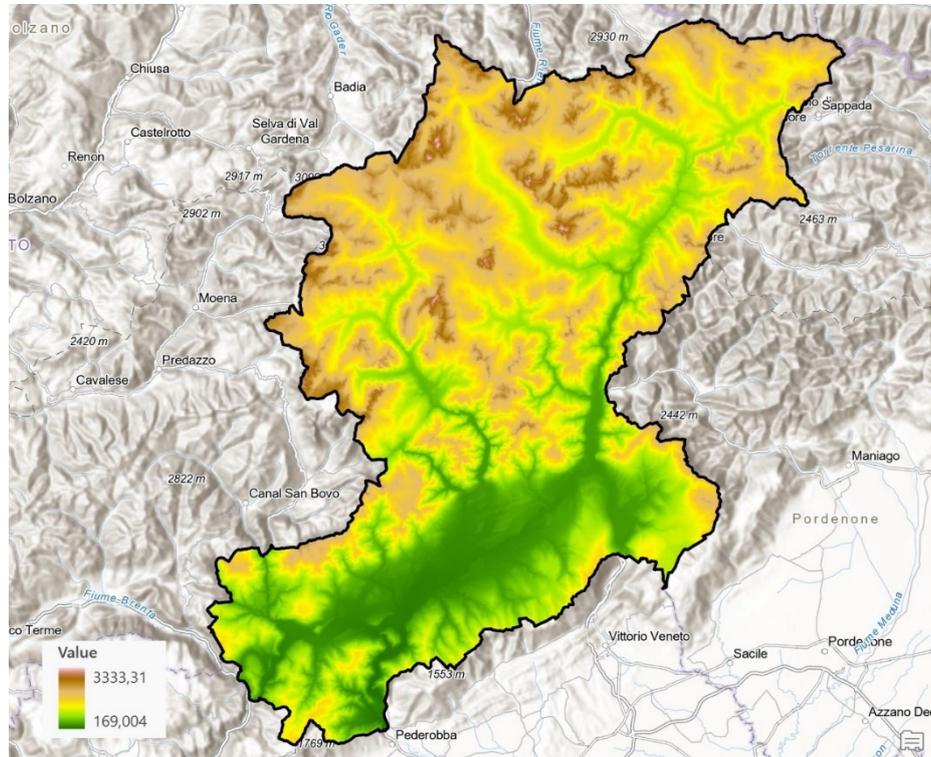


Fig. 4.1.2 Modello Digitale del Terreno di Belluno con risoluzione 10 metri

Dal Geoportale della Regione del Veneto, i dati mostrano l'individuazione di diversi poligoni, per l'esattezza 2.777, associati alle aree interessate da zone di frane, come mostrato in Figura 4.1.3. Si può notare che presentano sia dimensioni che posizioni molto variabili tra di loro. Il luogo maggiormente concentrato è collocato verso Ovest rispetto a Cortina d'Ampezzo.

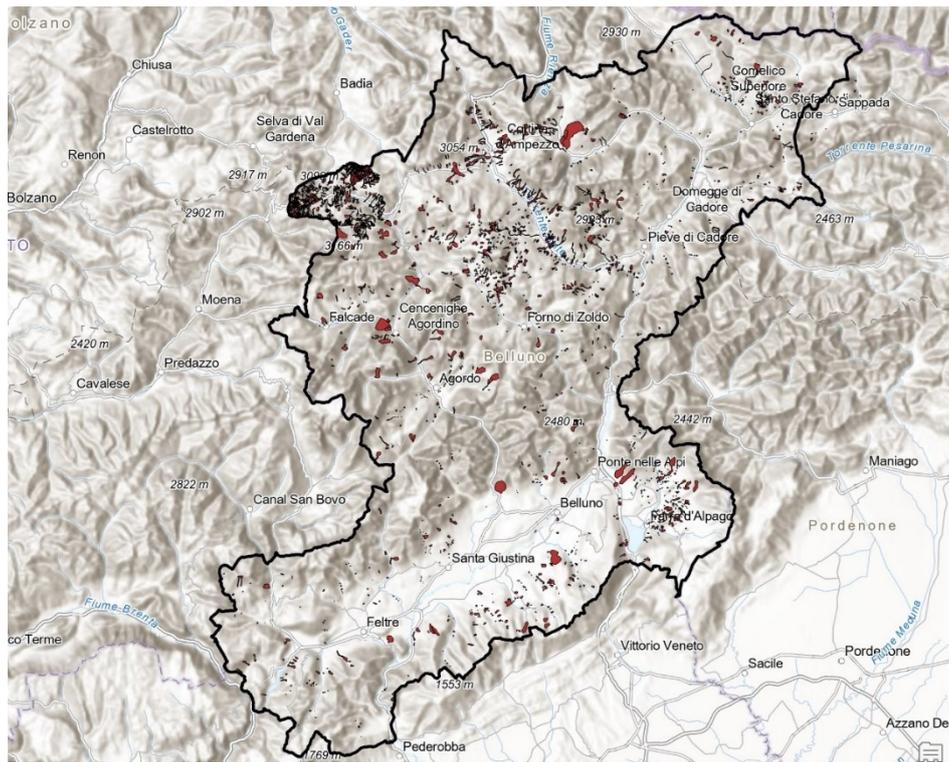


Fig. 4.1.3 Layer World Hillshade della Provincia di Belluno con le aree interessate da frane

4.2 Vicenza

Un'altra provincia collocata nella Regione del Veneto è Vicenza, che presenta una geologia ricca e variegata grazie alla sua posizione tra due ambienti diversi: le Alpi Meridionali e la Pianura Padana. (Figura 4.2.1).

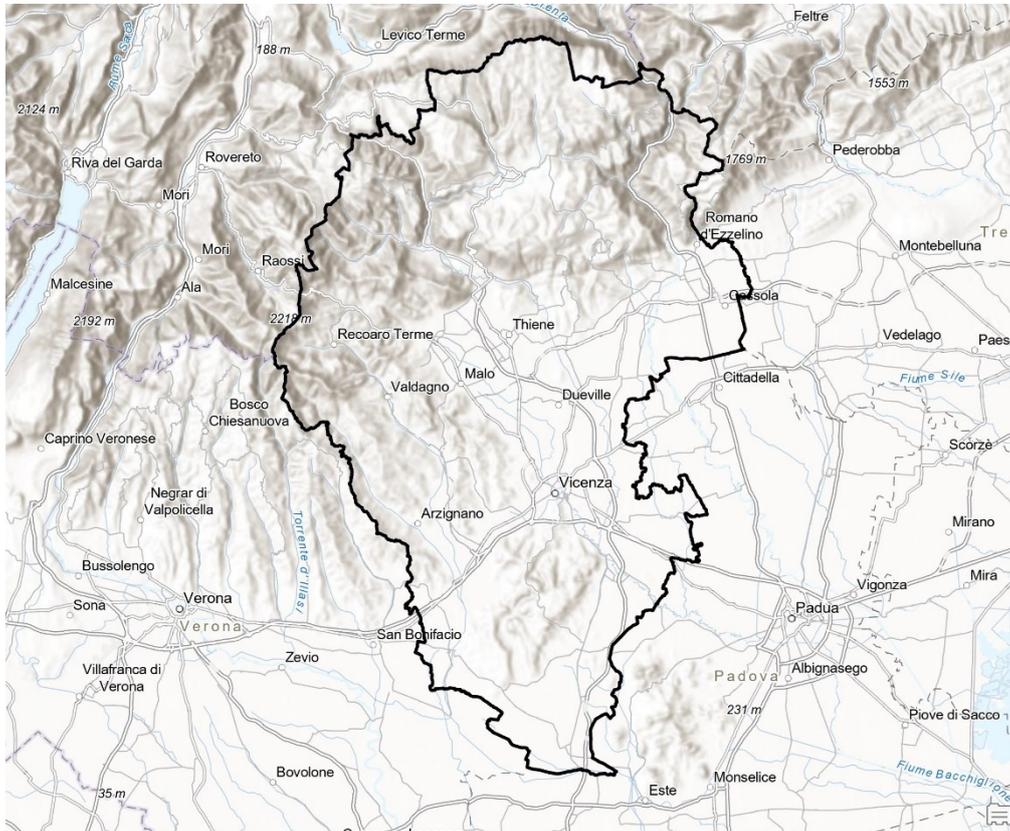


Fig. 4.2.1 Layer World Hillshade della Provincia di Vicenza

Partendo dall'alto il paesaggio si apre con le Prealpi Vicentine, che si estendono nella parte settentrionale verso il confine con il Trentino Alto Adige e sono costituite da formazioni calcaree e dolomitiche. La presenza delle rocce calcaree ha portato alla formazione di una serie di grotte e doline, caratteristiche di quest'area, grazie al fenomeno del carsismo, tipico dei paesaggi calcarei.

Scendendo verso Sud di Vicenza si presenta un rilievo collinare, formato principalmente da calcari e marne: i Colli Berici. Essi sono molto considerati per le loro formazioni rocciose uniche, come il rosso ammonitico ed il calcare berico. Anche qui, il carsismo è molto presente, dato che sono presenti numerose grotte e cavità che si sono originate dall'erosione delle rocce calcaree.

In quest'area sono visibili dei depositi di basalti e altre rocce ignee lungo le colate laviche, testimonianza di un'antica attività vulcanica

Concludendo verso il basso, nella parte meridionale, si trova la Pianura Padana, una vasta pianura alluvionale formata dai depositi dei fiumi che approdano dalle Alpi e dai rilievi circostanti. A Vicenza si trovano anche dei terreni di origine calcarea e dolomitica, come la Valle dell'Agno o l'area circostante, inclusa la montagna del Pasubio.

Anche Vicenza, come Belluno, si trova in una zona sismica, ma moderata, per l'attività tettonica dell'area alpina, dovuta alla compressione tra la placca africana e quella eurasiatica. Tale differenza si può notare anche dal numero di poligoni associate alle zone interessate da frane, che sono 297, individuate dal Geoportale della Regione del Veneto (Figura 4.2.2).

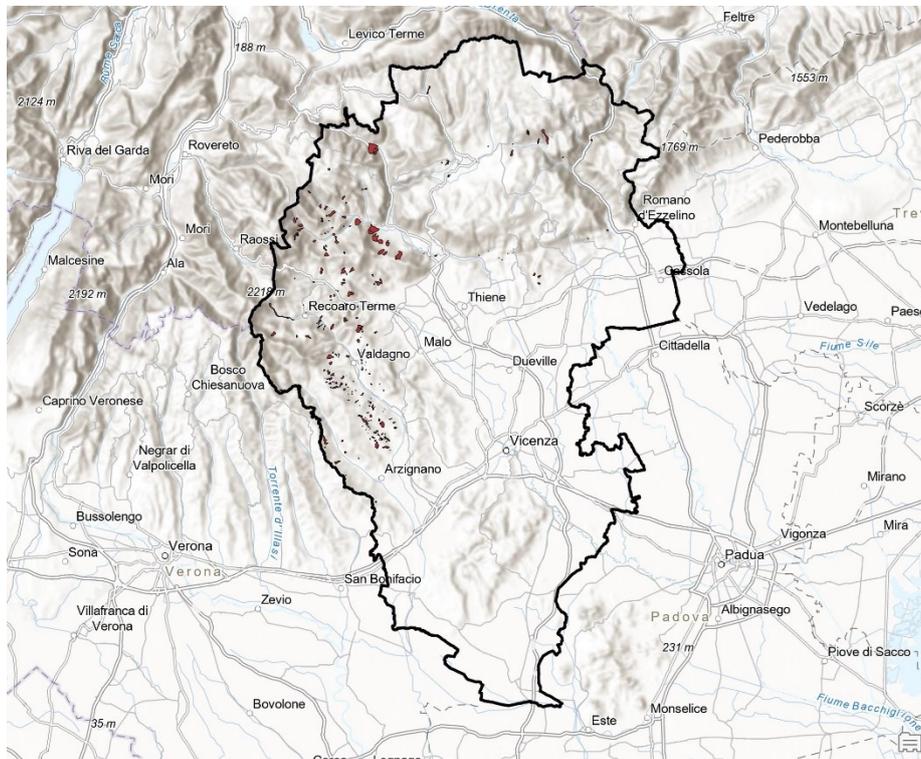


Fig. 4.2.2 Layer World Hillshade della Provincia di Vicenza con le zone interessate da frane

Fenomeni di frana sono particolarmente frequenti nella zona montuosa delle Prealpi Vicentine, a causa della pendenza dei versanti e, soprattutto, della natura calcarea e dolomitica delle rocce. Quest'ultimo punto è importante perché durante le piogge, l'acqua penetra nei terreni già fratturati, a causa del carsismo, e di conseguenza causa crolli

improvvisi. Tali fenomeni o anche le colate detritiche, sono innescate dalle piogge abbondanti che saturano i terreni, aumentando il peso e riducendo la coesione tra le particelle.

Anche i Colli Berici sono esposti a fenomeni di dissesti, dovuti alla struttura dei terreni calcarei e marnosi che sono facilmente erodibili. Ciò vuol dire che la zona presenta un substrato permeabile che assorbe l'acqua e quindi porta all'erosione e alla destabilizzazione del terreno durante il periodo di piogge intense, provocando delle frane di scivolamento.

La riduzione della stabilità del terreno è dovuta anche alla rimozione della vegetazione per lo sviluppo urbano o per l'espansione agricola, perché le radici servono a trattenere il suolo e senza di esse, i versanti sono più esposti agli smottanti ed all'erosione superficiale. Utilizzando il Modello Digitale del Terreno con risoluzione di 10 m (Figura 4.2.3) si può notare proprio l'estesa area pianeggiante con la presenza dei Colli Berici nella parte meridionale con altitudini fra 400 e 500 m.

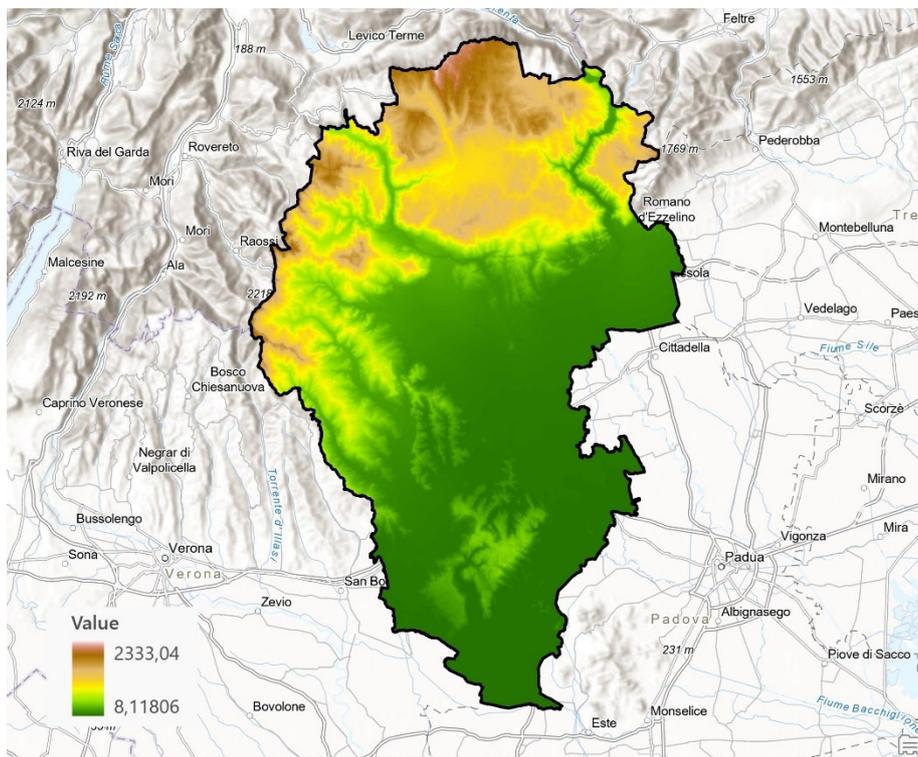


Fig. 4.2.3 Modello Digitale del Terreno di Vicenza con risoluzione 10 metri

4.3 Toscana

Nel caso della Toscana è stata individuata una zona di studio collocata nella parte settentrionale della Regione, secondo il criterio di delimitazione del Bacino del Reno. Tale area comprende una parte delle tre Provincie: Pistoia, Prato e Firenze (Figura 4.3.1). Tutti e tre fanno parte del dominio geologico dell'Appennino Settentrionale, una catena montuosa formata durante l'orogenesi alpina, e presentano una geologia influenzata dalla tettonica compressiva e quella distensiva successiva. La prima ha originato la sovrapposizione di unità tettoniche e la formazione delle catene montuose, mentre la seconda ha prodotto bacini intramontani.

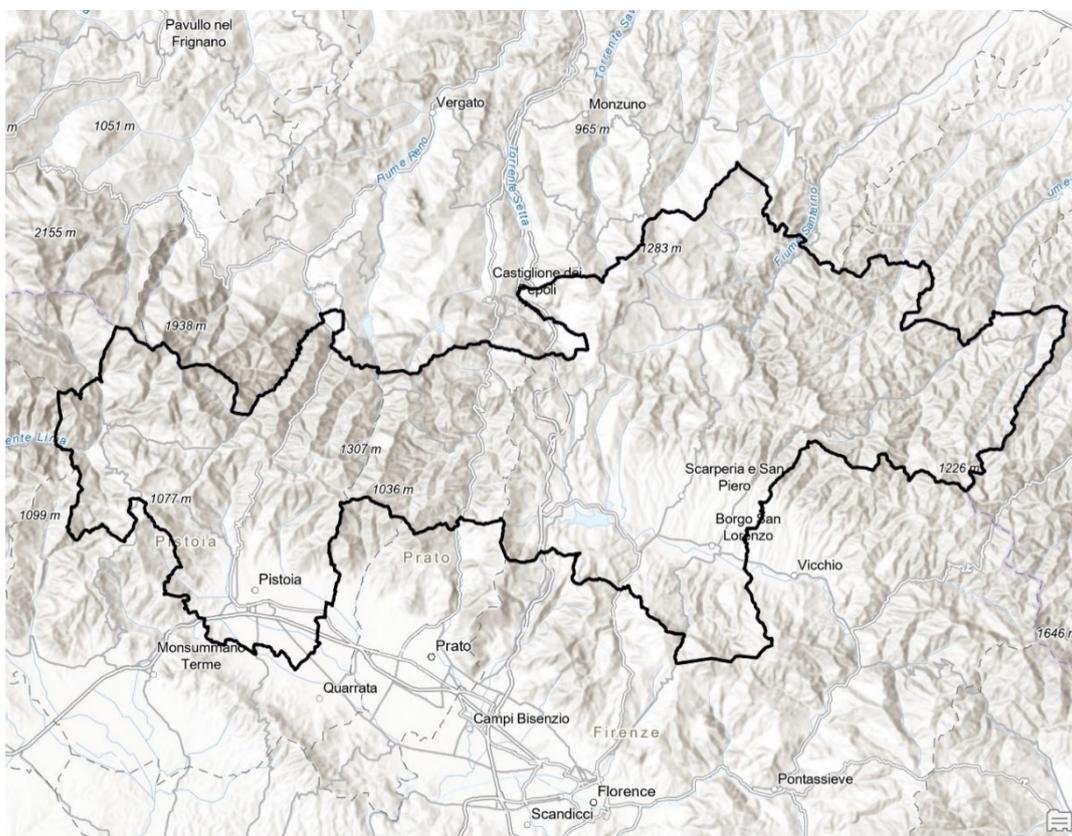


Fig 4.3.1 Rappresentazione della delimitazione del Bacino del Reno con il Layer World Hillshade che illustra parte delle Province di Pistoia, Prato e Firenze

La geologia dell'Appennino settentrionale presenta una stratigrafia complessa, con rocce facilmente alterabili e soggette a frane. Nella zona di studio sono presenti diverse unità tettoniche caratterizzate una da rocce sedimentarie come argilliti, arenarie e marne, una composta da calcari e dolomie ed in un'altra si trovano sedimenti alluvionali e colluviali

che testimoniano la continua evoluzione geomorfologica dell'area. Le strutture geologiche principali includono faglie normali e sovrascorrimenti che riflettono un'evoluzione tettonica complessa. Dal punto di vista litologico, passando da argilliti e marne che sono soggette a frane e smottamenti alle arenarie marnose particolarmente instabili dal punto di vista geologico ed in alcune zone appenniniche più elevate, affiorano scisti e gneiss, più resistenti all'erosione. Tale varietà litologica contribuisce alla diversità dei suoli ed alla vulnerabilità dell'area ai rischi geologici. Le pendici appenniniche sono dominate dalle foreste ed esse giocano un ruolo importante nella stabilizzazione dei versanti.

La dorsale appenninica corre lungo il confine settentrionale dell'area, segnando il limite tra Toscana ed Emilia-Romagna. Vicino al confine c'è il Monte Gennaio e Monte Cupolino che appartengono alla dorsale pistoiese. La fascia collinare domina gran parte del paesaggio tra le aree montuose e le pianure, come ad esempio le Colline del Montalbano. Le colline di transizione presentano pendenze variabili: dolci nelle zone agricole e ripide ed instabili nelle aree boschive o con substrati argillosi (Figura 4.3.2).

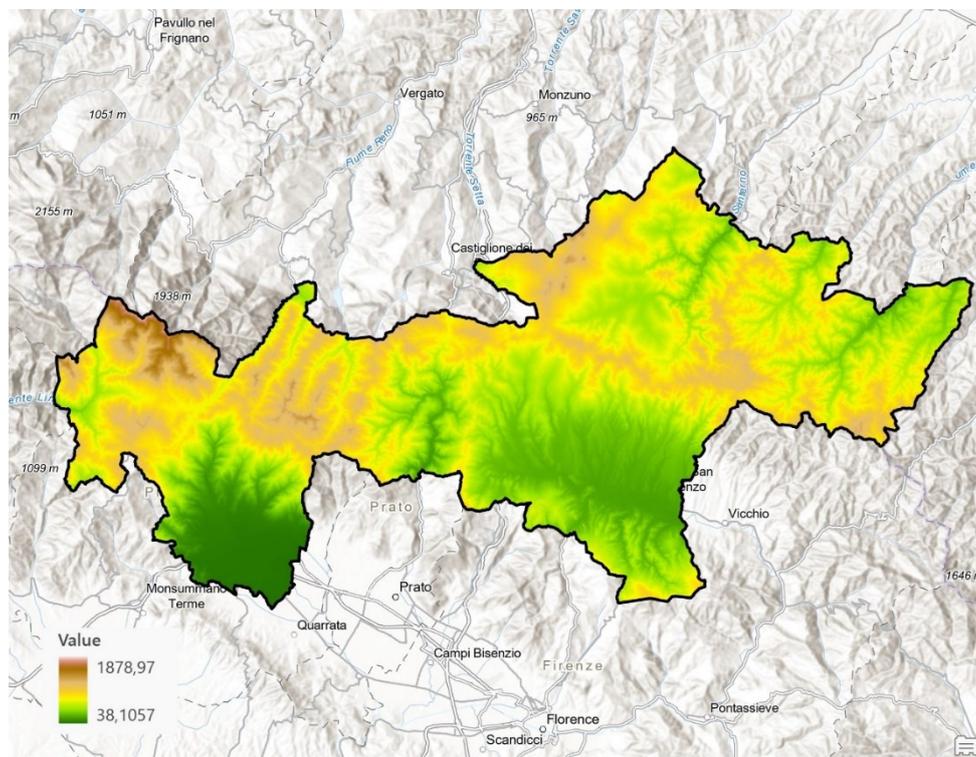


Fig 4.3.2 DTM della delimitazione del Bacino del Reno con risoluzione 10 metri

La Toscana è soggetta ad eventi meteorologici estremi, come le precipitazioni intense del periodo autunnale e primaverile che causano la saturazione del terreno nei versanti argillosi, con conseguente perdita di coesione e lo scorrimento superficiale dell'acqua che amplifica l'erosione e favorisce gli smottamenti. Nelle aree montane, in particolare nell'Appennino Pistoiese, i cicli di congelamento e disgelo portano alla frammentazione delle rocce, riducendo la stabilità e favorendo il crollo dei blocchi.

Anche la Regione della Toscana, come Vicenza, è un'area a moderato rischio sismico e dei terremoti di bassa-media magnitudo possono destabilizzare i pendii già fragili, amplificano il rischio dei crolli.

Le ripide pendenze dell'Appennino e rilievi collinari favoriscono fenomeni franosi, soprattutto nei terreni marno-arenacei. L'Inventario dei Fenomeni Franosi ha individuato delle aree interessate da frane nella Regione della Toscana, 6.408, come illustrato nella Figura 4.3.3.

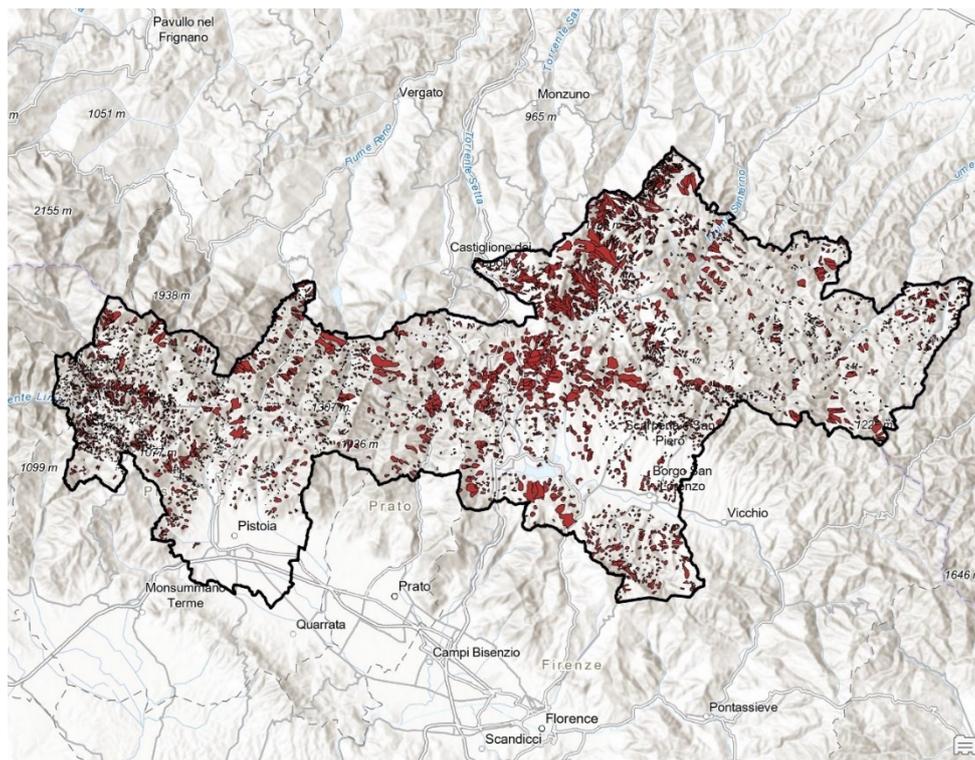


Fig 4.3.3 Zone interessate da frane nell'area di studio con il Layer World Hillshade

5. Metodologia

5.1 Formato dei dati

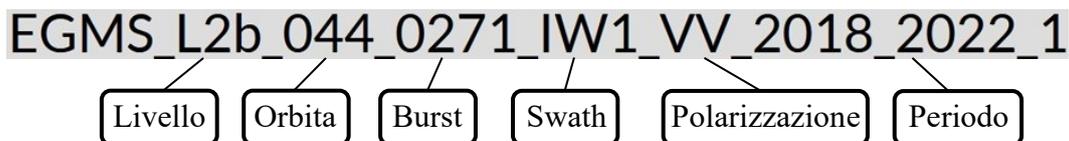
Per scaricare i dati interferometrici, bisogna essersi collegati al sito ufficiale dell'EGMS ed essersi registrati. Dopo aver individuato diverse aree di studio con i poligoni sulla mappa, sono stati raccolti i dati EGMS e organizzati in base al periodo di scansione, alle orbite coinvolte ed alla modalità di scansione su ArcGIS Pro. Tali informazioni, poi, sono state armonizzate per evitare di andare incontro alla sovrapposizione dei dati e, di conseguenza, ritrovarsi con valori che si ripetono e quindi influire sul risultato finale della valutazione quantitativa.

I file riportati negli elenchi sono in formato CSV e contengono tutte le informazioni di ciascuna sequenza. Il servizio EGMS ha stabilito un modo di nominare tali file in modo chiaro e preciso da permettere all'utente di comprendere meglio il materiale scaricato su cui sta lavorando.

Nella dicitura EGMS_L2b_xxx_yyyy_IWz_ww_aaaa_bbbb_c, ogni stringa ha un suo significato:

- *xxx* indica il numero dell'orbita.
- *yyy* rappresenta il numero progressivo della sequenza all'interno dell'orbita, il burst.
- *z* esprime il numero di scansione dal più vicino al più lontano. Può avere valore da 1 a 3, dove 1 è meno inclinato.
- *ww* mostra la polarizzazione. Per la singola polarizzazione può avere la dicitura HH o VV.
- *aaaa* indica il primo anno della sequenza temporale di anni in cui sono inclusi i dati.
- *bbbb* si riferisce all'ultimo anno della sequenza temporale di anni in cui sono inclusi i dati.
- *c* rappresenta la versione dei dati recapitati.

Ricapitolando:



Successivamente sono stati scaricati altri dati interferometrici dai Geoportali della Regione del Veneto e della Toscana, nostre aree di studio. Le Regioni ricavano i dati dall'archivio EGMS e li pubblicano sui loro geoportali, ma con delle modifiche nella tabella degli attributi, in modo che siano pochi, semplici e comprensibili alla portata di tutti gli utenti che usufruiscono di tale servizio (Figura 5.1.1 e 5.1.2)

CODE	HEIGHT	H_STDEV	VEL	V_STDEV	ACC	A_STDEV
B8KJ7CB	2147.8	4.4	-5	0.3	-5.2	0.7
B85ND7Y	2206.8	3.5	0.2	0.2	-1.9	0.6
B8C74VR	2292.7	3.2	-1	0.2	-1.2	0.5
B6ZZ0VT	2379	3.3	0	0.2	-2.5	0.5
B83V2FE	2367.3	3	-0.6	0.1	-0.3	0.5
B8MBI98	2695	7.7	2.5	0.3	-0.7	1.3
B8L4N1R	2723.9	7.9	2	0.2	-0.8	1.3
B8O3T2M	2687.6	7.3	1.8	0.2	-1.1	1.2
B8O3T2N	2691.1	7.4	2	0.2	-1.2	1.2

Fig 5.1.1 Tabella degli attributi EGMS dei dati interferometrici scaricati dal Geoportale di una Regione, prima parte

I campi riportati nella tabella sopra indicano diverse informazioni. La prima colonna riporta la dicitura *code*, un codice univoco per ogni punto di misurazione all'interno del file; segue l'altezza con la dicitura *height*, che individua l'elevazione geodetica del punto di misurazione ed è utile per conoscere la posizione altimetrica del suolo rispetto al riferimento globale WGS84, e la sua deviazione standard, ovvero l'incertezza nella misura dell'altezza, *h_stdev*; la velocità, *vel*, descrive la velocità di deformazione con cui il terreno si sta spostando verticalmente o orizzontalmente rispetto alla posizione iniziale, e la sua deviazione standard, cioè la misura dell'affidabilità o variabilità delle sue misurazioni, *v_stdev*; l'accelerazione, abbreviato in *acc*, fornisce informazioni sulla variazione della velocità di movimento nel tempo, dimostrando se il moto sta rallentando,

accelerando o se sta rimanendo costante nel tempo, fornendo un'indicazione delle variazioni nella tendenza del movimento, e la sua deviazione standard, *a_stdev*, che riflette l'incertezza nelle sue misurazioni, utile per analizzare cambiamenti nel trend di movimento.

COHERENCE	EFF_AREA	D20190106	D20190112	D20190118
0.67	1661	0	2.2	3.6
0.73	0	0	-1.9	-4.8
0.72	0	0	-2.1	-2.2
0.88	0	0	2.1	0
0.88	0	0	-4.4	-3
0.37	0	0	7.5	11.2
0.63	0	0	-1	-8.9
0.75	0	0	-1.2	10.3
0.77	0	0	-7.5	-12.8

Fig 5.1.2 Tabella degli attributi EGMS dei dati interferometrici scaricati dal Geoportale di una Regione, seconda parte

Proseguendo con i campi, *coherence* è la coerenza dei dati radar nel tempo per quel punto di misurazione, con valori che vanno da 0, poco attendibile, ad 1, maggiore affidabilità, e l'*eff_area* indica l'area effettiva di una cella utilizzata per calcolare la misura al punto. Infine le ultime colonne indicate con *Daaaammgg* contengono valori di spostamento per quella data acquisizione: il segno si riferisce a movimenti in avvicinamento, positivo, o in allontanamento, negativo, dal satellite. Tali colonne permettono di costruire la serie storica dei punti di misurazione dell'area d'interesse.

Nella tabella degli attributi del servizio EGMS sono riportati tutte le informazioni dettagliate ed i valori dei diversi campi per avere una visuale a 360° dei dati coinvolti durante l'acquisizione (Figura 5.1.3, 5.1.4, 5.1.5 e 5.1.6).

pid	mp_type	latitude	longitude	easting	northing
1kFYF2pSK9	0	45.884875	11.861802	4465692.12	2532038.55
1kFYF2j87D	0	45.884328	11.887834	4467716.18	2532028.81
1kFYF2oM8D	0	45.885484	11.861071	4465633.71	2532104.71
1kFYF2kVQP	0	45.885245	11.87626	4466814.5	2532107.79
1kFYF2o55B	0	45.885597	11.861178	4465641.73	2532117.51
1kFYF2kENN	0	45.885377	11.876226	4466811.45	2532122.41
1kFYF2jxKP	0	45.88552	11.876114	4466802.42	2532138.04
1kFYF2kENR	0	45.885392	11.876112	4466802.57	2532123.89
1kFYF2kENO	0	45.885373	11.876255	4466813.74	2532122.04
1kFYF2jxKO	0	45.885517	11.876133	4466803.88	2532137.79

Fig 5.1.3 Tabella degli attributi EGMS dei dati interferometrici scaricati dal sito ufficiale dell'EGMS, prima parte

Il primo parametro che “apre” la tabella è il *pid*, che assume il ruolo di indicatore univoco per ogni punto di misurazione con 10 caratteri alfanumerici. Il valore dell'*mp_type* è sempre 0, dato che si sta lavorando con i Permanent Scatterer, bersagli radar individuati sulla superficie terrestre dal satellite, in corrispondenza dei quali è possibile realizzare misure di spostamento con una precisione millimetrica.

La *latitude* e la *longitude* indicano la latitudine e la longitudine del MP, con 6 cifre dopo il punto. L'*easting* ed il *northing* sono i punti cardinali basati sul Sistema Europeo di Riferimento Terrestre del 1989 con la proiezione azimutale equivalente di Lambert (ETRS89-LAEA).

height	height_wgs	line	pixel	rmse	temporal_c
1219.6	1267.8	638	4313	4.5	0.62
863.2	911.2	615	3991	3.9	0.69
1229.4	1277.6	634	4325	4.7	0.6
736.8	784.9	620	4241	3.5	0.71
1225.9	1274.1	633	4325	4.2	0.67
740.2	788.3	619	4241	2	0.9
736.4	784.5	618	4245	2	0.9
734.8	782.9	619	4245	2.2	0.87
736	784.1	619	4242	3	0.81
738.2	786.3	618	4244	3	0.8

Fig 5.1.4 Tabella degli attributi EGMS dei dati interferometrici scaricati dal sito ufficiale dell'EGMS, seconda parte

La differenza principale tra i due campi *height* e *height_wgs* sta proprio nel tipo di sistema geodetico usato. Il primo fa riferimento all'altezza ortometrica del punto di misurazione rispetto al geode EGM2008, mentre il secondo, come si deduce, indica l'altezza ellissoidale del MP rispetto all'ellissoide WGS84.

La *line* esprime la posizione degli MP lungo la direzione di azimuth, che è parallela alla traiettoria del satellite SAR, all'interno del burst rispetto al prodotto di riferimento. Il *pixel*, invece, si riferisce alla posizione lungo la direzione in range, distanza radiale tra il sensore ed il punto a terra perpendicolare alla traiettoria del satellite, all'interno del burst rispetto al prodotto di riferimento. Il valore della *line* fa riferimento alla riga dell'immagine SAR in cui è collocato un MP lungo la direzione del volo del satellite, mentre il valore del range alla colonna dell'immagine SAR.

L'acronimo *rmse*, Root Mean Square Error, è una misura di dispersione dei residui, differenze tra i valori osservati e i valori predetti dal modello, ed indica quanto il modello si discosta dai dati osservati. Valori bassi indicano un modello accurato, mentre valori alti suggeriscono una maggiore imprecisione nel modello. Il *temporal_c* è la coerenza temporale del punto di misurazione rispetto alla velocità del movimento del suolo stimata attraverso una regressione lineare. Se si avvicina ad 1, i dati del MP seguono una tendenza lineare coerente, mentre se si avvicina a 0, il movimento del suolo risulta irregolare.

amplitude_	incidence_	track_angl	los_east	los_north	los_up
0.48	31.93	188.98	0.522	-0.083	0.849
0.48	31.78	188.98	0.52	-0.082	0.85
0.56	31.94	188.98	0.522	-0.083	0.849
0.45	31.84	188.98	0.521	-0.082	0.85
0.51	31.93	188.98	0.522	-0.083	0.849
0.35	31.84	188.98	0.521	-0.082	0.85
0.36	31.84	188.98	0.521	-0.082	0.85
0.4	31.84	188.98	0.521	-0.082	0.85
0.44	31.84	188.98	0.521	-0.082	0.85
0.49	31.84	188.98	0.521	-0.082	0.85

Fig 5.1.5 Tabella degli attributi EGMS dei dati interferometrici scaricati dal sito ufficiale dell'EGMS, terza parte

L'*amplitude* è calcolato da un indice di dispersione dell'ampiezza che è dato dal rapporto tra la deviazione standard dell'ampiezza e l'ampiezza media. L'*incidence_angle* ed il *track_angle* sono l'angolo d'incidenza e l'angolo di traccia per ogni MP. I *los_east*, *los_nord* e *los_up* sono i coseni degli angoli formati dalla direzione della Line Of Sight con ciascuno degli assi del sistema di coordinate: est, componente orientata lungo l'asse Est-Ovest; nord, componente orientata lungo l'asse Nord-Sud; verticale, componente perpendicolare al suolo.

mean_veloc	mean_vel_1	accelerati	accelera_1	seasonalit	seasonal_1
-0.4	1.4	-0.83	0.32	7	4.3
-0.3	1.2	-0.14	0.27	8.1	3.7
-0.1	1.5	-0.82	0.33	14	4.4
0.2	1.1	-0.31	0.25	7.2	3.3
0	1.3	-0.78	0.29	2.2	3.9
0.1	0.6	-0.18	0.14	7.6	1.9
-0.1	0.6	-0.27	0.14	8.2	1.9
-0.1	0.7	-0.07	0.16	14.1	2
0.1	0.9	-0.28	0.21	8.3	2.8
-0.2	0.9	-0.56	0.21	6.6	2.9

Fig 5.1.6 Tabella degli attributi EGMS dei dati interferometrici scaricati dal sito ufficiale dell'EGMS, quarta parte

È presente la *mean_veloc* che rappresenta la velocità media valutata sui residui delle serie temporali, e la sua deviazione standard, *mean_vel_1*, stimata utilizzando una propagazione della varianza sul modello di regressione. Anche l'accelerazione, *accelerati*, e la sua deviazione standard, *accelera_1*, seguono gli stessi passaggi della velocità. Il valore della stagionalità, *seasonalit*, è l'ampiezza dell'oscillazione stagionale, e la sua deviazione standard è calcolata sulla stima dell'ampiezza stagionale, *seasonal_1*.

5.2 Belluno

Disegnata l'area della provincia di Belluno sulla mappa dell'EGMS Explorer ed individuati i risultati dei prodotti da scaricare, sono stati scelti i prodotti Calibrati (L2b) che ricoprono tutta la zona d'interesse lungo i periodi dal 2015 al 2021 e dal 2018 al 2022.

2015-2021

- Orbita ascendente:
 - EGMS_L2b_044_0271_IW1_VV
 - EGMS_L2b_044_0272_IW1_VV
 - EGMS_L2b_044_0273_IW1_VV
 - EGMS_L2b_044_0274_IW1_VV
 - EGMS_L2b_044_0275_IW1_VV
 - EGMS_L2b_044_0276_IW1_VV
 - EGMS_L2b_117_0270_IW2_VV
 - EGMS_L2b_117_0270_IW3_VV
 - EGMS_L2b_117_0271_IW2_VV
 - EGMS_L2b_117_0271_IW3_VV
 - EGMS_L2b_117_0272_IW2_VV
 - EGMS_L2b_117_0272_IW3_VV
 - EGMS_L2b_117_0273_IW2_VV
 - EGMS_L2b_117_0273_IW3_VV
 - EGMS_L2b_117_0274_IW2_VV
 - EGMS_L2b_117_0274_IW3_VV
 - EGMS_L2b_117_0275_IW3_VV

Come si può notare, nell'orbita ascendente sono coinvolte l'orbita n° 044 e 117. Si nota subito la differenza tra le due per il conteggio delle scansioni: la prima ha un solo swath, IW1 come illustrato nella Figura 5.2.1, mentre la seconda ne ha due, IW2 e IW3. Infatti, sulla mappa si può visualizzare proprio la separazione tra i due swath, grazie anche alla diversa rappresentazione di colore, per comprendere di più l'aspetto tecnico come mostrato nella Figura 5.2.2. Ci potrebbero essere delle sovrapposizioni tra diversi burst di una stessa scansione e devono essere rimosse per evitare di andare incontro a dei risultati errati per colpa della ripetizione dei dati che possono compromettere le statistiche, e, soprattutto, per avere una visuale completa. Si procede poi all'unione dei burst appartenenti a swath diversi, perché la variazione degli angoli di vista non produce variazioni significative nelle misurazioni della velocità (Figura 5.2.3).

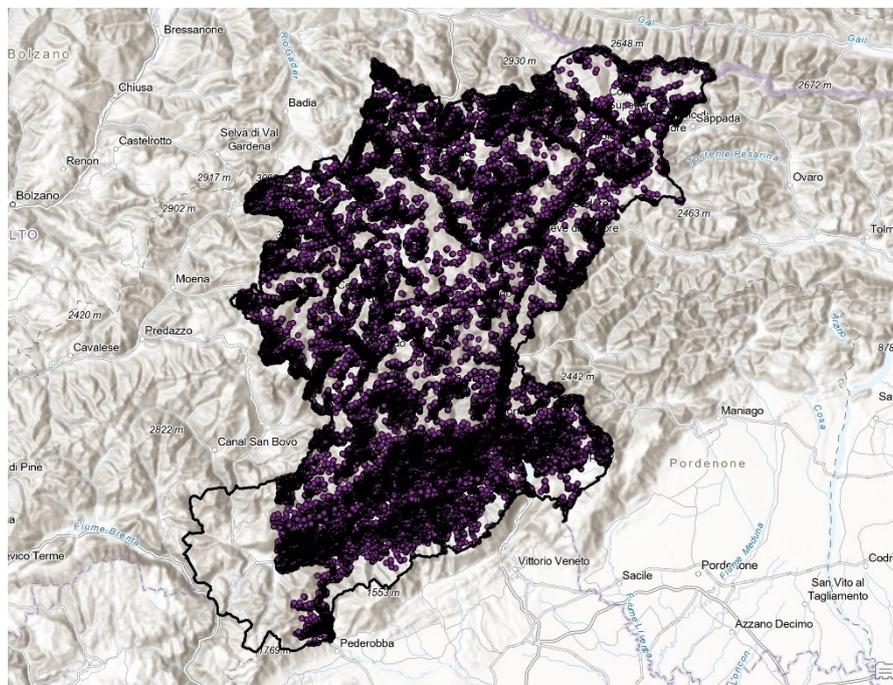


Fig 5.2.1 Orbita 044 IW1 2015-2021

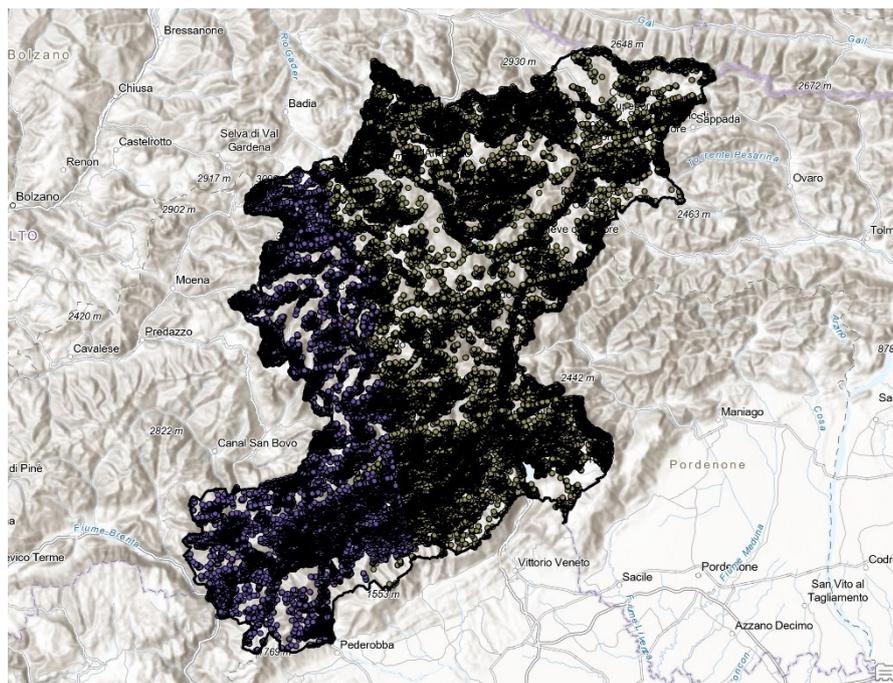


Fig 5.2.2 Orbita 117 IW2 e IW3 2015-2021

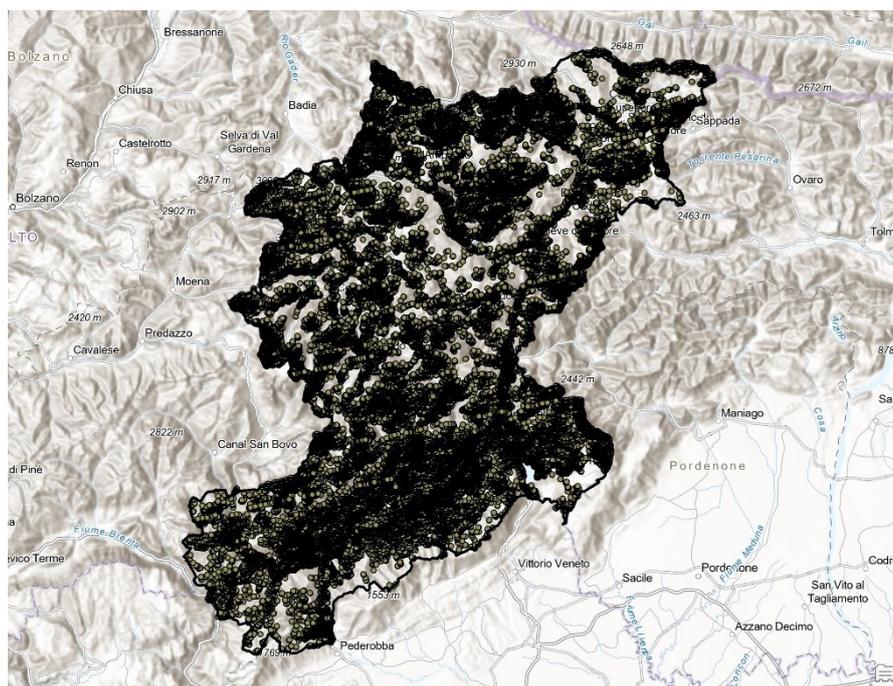


Fig 5.2.3 Orbita 117 con unificazione delle due scansioni IW2 e IW3 2015-2021

- Orbita discendente:
 - EGMS_L2b_095_0797_IW2_VV
 - EGMS_L2b_095_0798_IW2_VV
 - EGMS_L2b_095_0798_IW3_VV
 - EGMS_L2b_095_0799_IW2_VV
 - EGMS_L2b_095_0799_IW3_VV
 - EGMS_L2b_095_0800_IW2_VV
 - EGMS_L2b_095_0800_IW3_VV
 - EGMS_L2b_095_0801_IW2_VV
 - EGMS_L2b_095_0801_IW3_VV
 - EGMS_L2b_095_0802_IW2_VV
 - EGMS_L2b_095_0802_IW3_VV
 - EGMS_L2b_168_0796_IW1_VV
 - EGMS_L2b_168_0797_IW1_VV
 - EGMS_L2b_168_0798_IW1_VV
 - EGMS_L2b_168_0799_IW1_VV
 - EGMS_L2b_168_0800_IW1_VV
 - EGMS_L2b_168_0801_IW1_VV

In questo caso, sono coinvolte due orbite, la n° 095 e 168. La prima con due scansioni diverse (Figura 5.2.4), mentre la seconda ne presenta solo una (Figura 5.2.5).

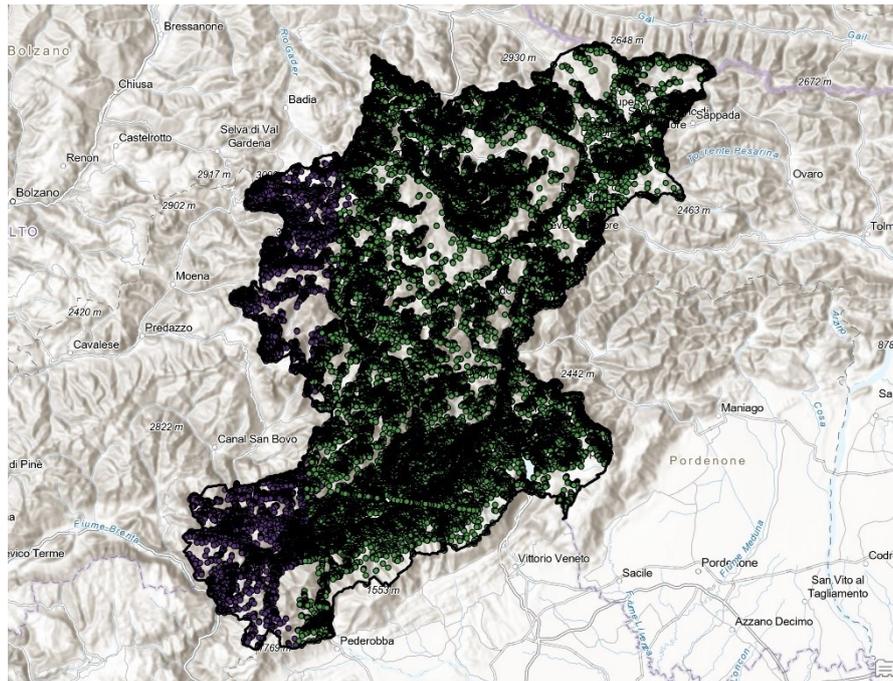


Fig 5.2.4 Orbita 095 IW2 e IW3 2015-2021

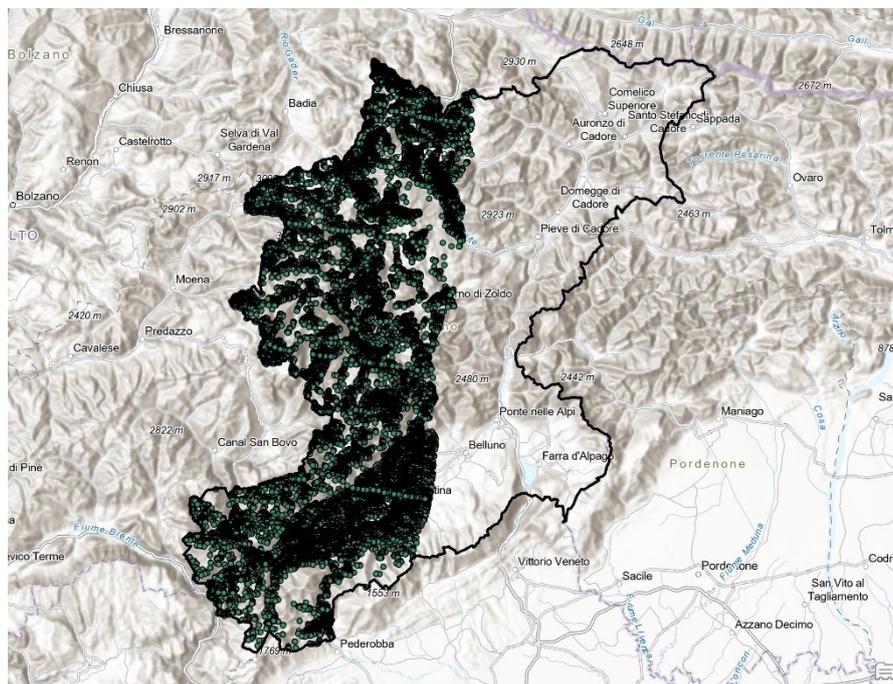


Fig 5.2.5 Orbita 168 IW1 2015-2021

Anche qui viene eseguito lo stesso passaggio di unire gli swath dell'orbita 095 (Figura 5.2.6).

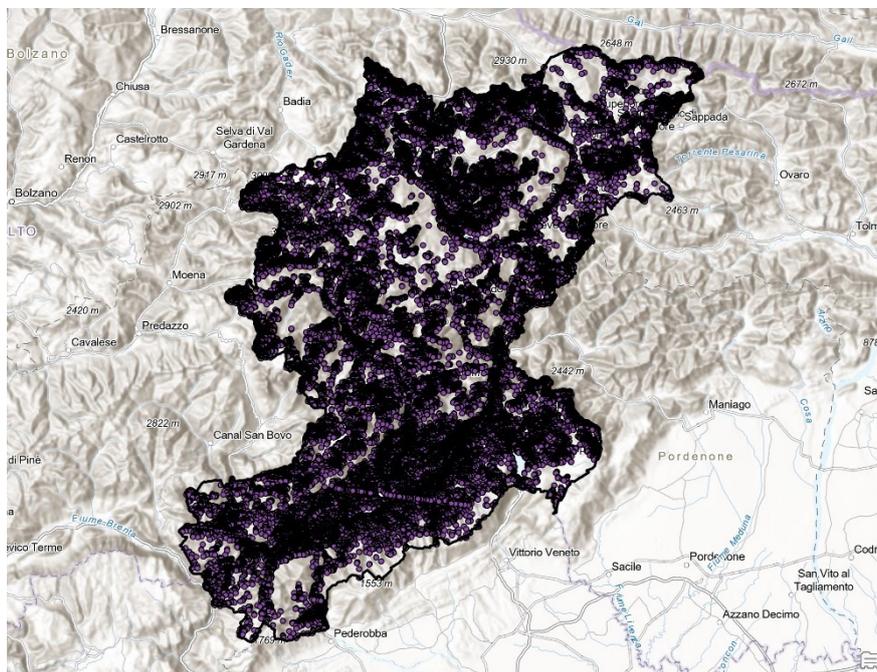


Fig 5.2.6 Orbita 095 con unificazione dei due swath IW2 e IW3 2015-2021

2018-2022

- Orbita ascendente:
 - EGMS_L2b_117_0270_IW2_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_117_0270_IW3_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_117_0271_IW2_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_117_0271_IW3_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_117_0272_IW2_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_117_0272_IW3_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_117_0273_IW2_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_117_0273_IW3_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_117_0274_IW2_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_117_0274_IW3_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_117_0275_IW2_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_117_0275_IW3_VV_2018_2022_1

Nel periodo 2018-2022 dell'orbita ascendente è presente solo la n° 117 con due swath IW2 e IW3 (Figura 5.2.7), che poi verranno coniugate per ottenere un unico dataset (Figura 5.2.8).

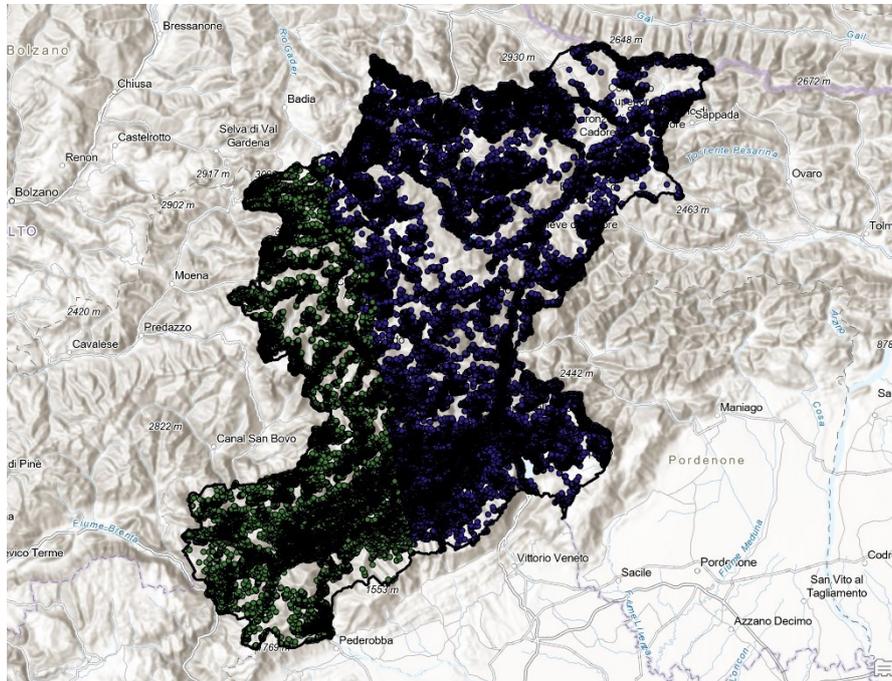


Fig 5.2.7 Orbita 117 IW2 e IW3 2018-2022

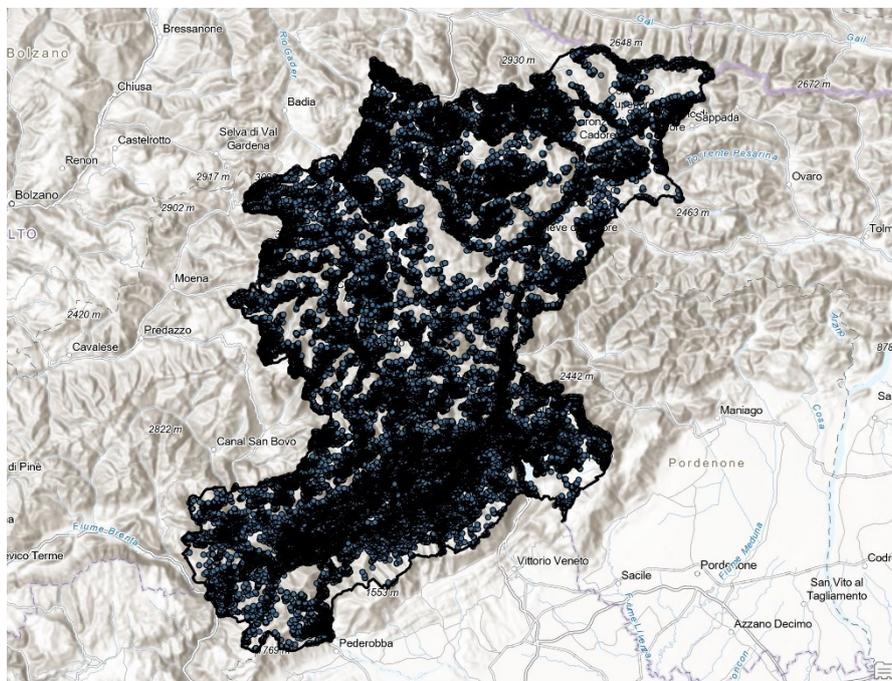


Fig 5.2.8 Orbita 117 con unificazione delle due scansioni 2018-2022

- Orbita discendente:
 - EGMS_L2b_095_0797_IW2_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_095_0797_IW3_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_095_0798_IW2_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_095_0798_IW3_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_095_0799_IW2_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_095_0799_IW3_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_095_0800_IW2_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_095_0800_IW3_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_095_0801_IW2_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_095_0801_IW3_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_095_0802_IW2_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_095_0802_IW3_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_095_0803_IW2_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_168_0796_IW1_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_168_0797_IW1_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_168_0798_IW1_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_168_0799_IW1_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_168_0800_IW1_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_168_0801_IW1_VV_2018_2022_1

Due orbite, la n° 095 e la 168. La prima con due scansioni diverse che poi successivamente verranno assemblate (Figura 5.2.9 e 5.2.10), mentre la seconda ne presenta solo una (Figura 5.2.11).

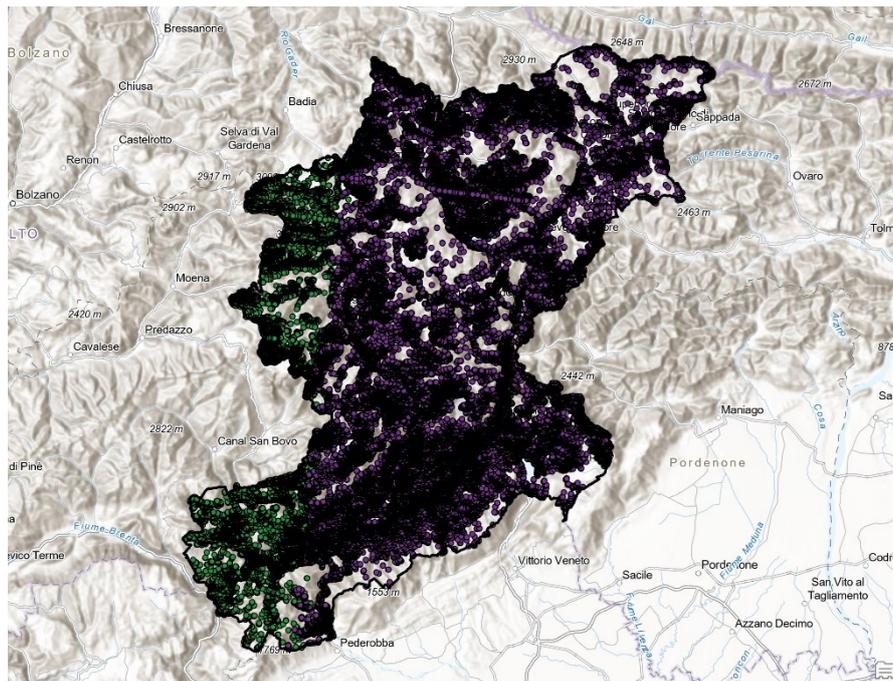


Fig 5.2.9 Orbita 095 IW2 e IW3 2018-2022

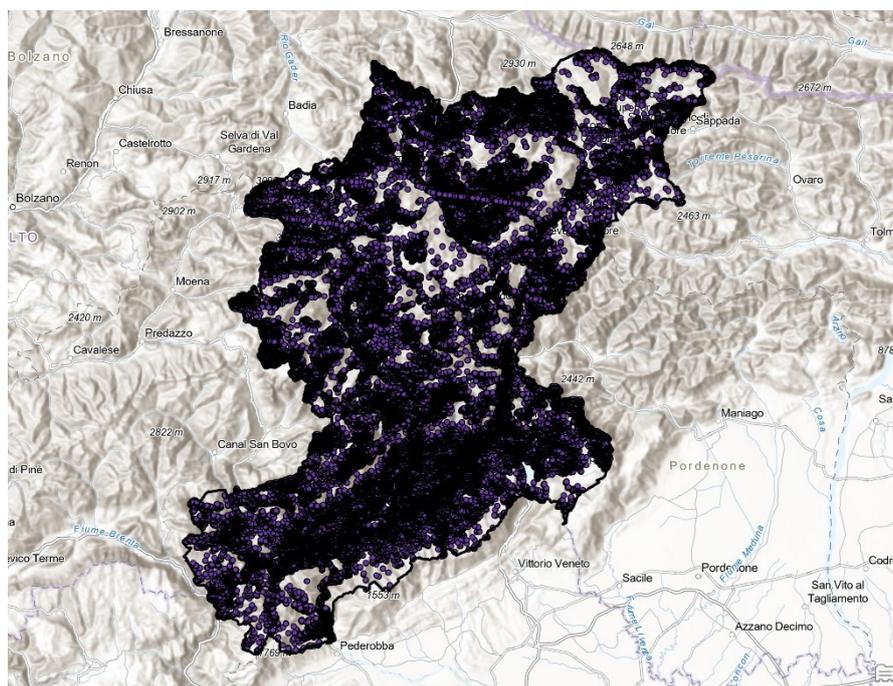


Fig 5.2.10 Orbita 095 con IW2 e IW3 assemblate 2018-2022

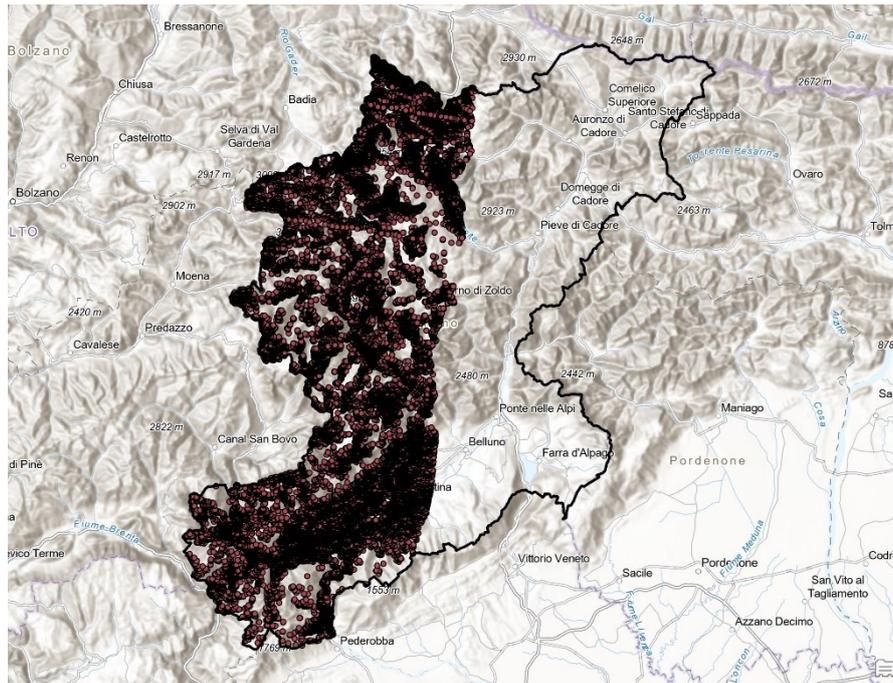


Fig 5.2.11 Orbita 168 IW1 2018-2022

5.3 Vicenza

Nel caso di Vicenza, i passaggi che riguardano la scelta dei dati in base alle orbite ed alle modalità di scansione da scaricare ed analizzare sono risultati più agevolati, perché è bastata solo un'unica scansione a ricoprire tutta l'area della provincia di Vicenza, rispetto a Belluno, che invece ha richiesto due tipi di scansioni. Anche qui, sono stati scelti i prodotti Calibrati con i periodi dal 2015 al 2021 e dal 2018 al 2022.

2015-2021

- Orbita ascendente:
 - EGMS_L2b_117_0267_IW2_VV
 - EGMS_L2b_117_0268_IW2_VV
 - EGMS_L2b_117_0269_IW2_VV
 - EGMS_L2b_117_0270_IW2_VV
 - EGMS_L2b_117_0271_IW2_VV

Viene illustrata l'orbita 117 con un solo swath (Figura 5.3.1).

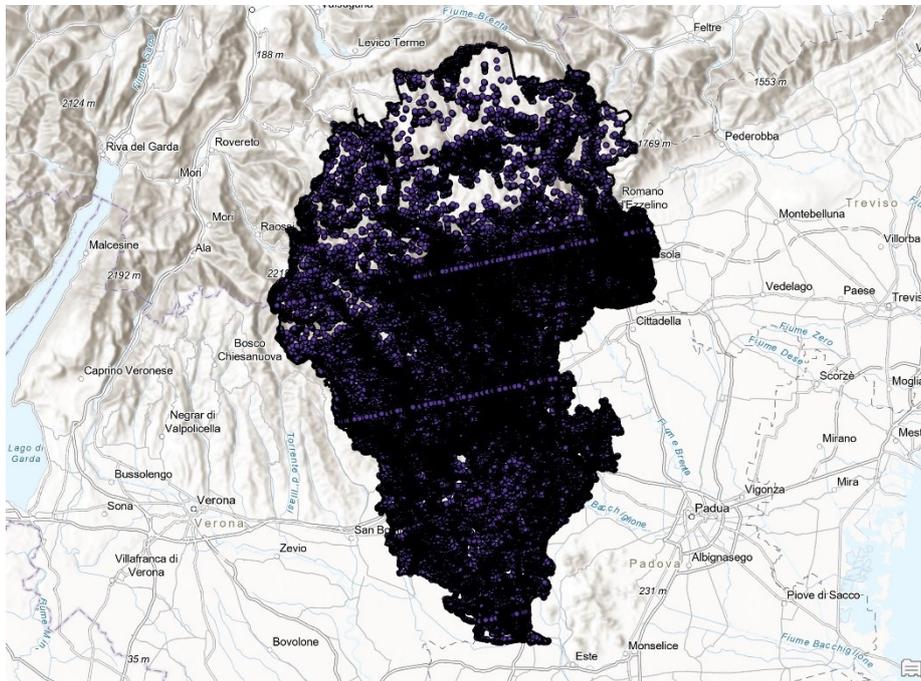


Fig 5.3.1 Orbita 117 IW2 2015-2021

- **Orbita discendente:**
 - EGMS_L2b_095_0801_IW3_VV
 - EGMS_L2b_095_0802_IW3_VV
 - EGMS_L2b_095_0803_IW3_VV
 - EGMS_L2b_095_0804_IW3_VV
 - EGMS_L2b_095_0805_IW3_VV
 - EGMS_L2b_095_0806_IW3_VV
 - EGMS_L2b_168_0800_IW1_VV
 - EGMS_L2b_168_0801_IW1_VV
 - EGMS_L2b_168_0802_IW1_VV
 - EGMS_L2b_168_0803_IW1_VV
 - EGMS_L2b_168_0804_IW1_VV
 - EGMS_L2b_168_0805_IW1_VV

Sono stati individuati le orbite 095 e 168, sempre con un solo swath (Figura 5.3.2 e 5.3.3).

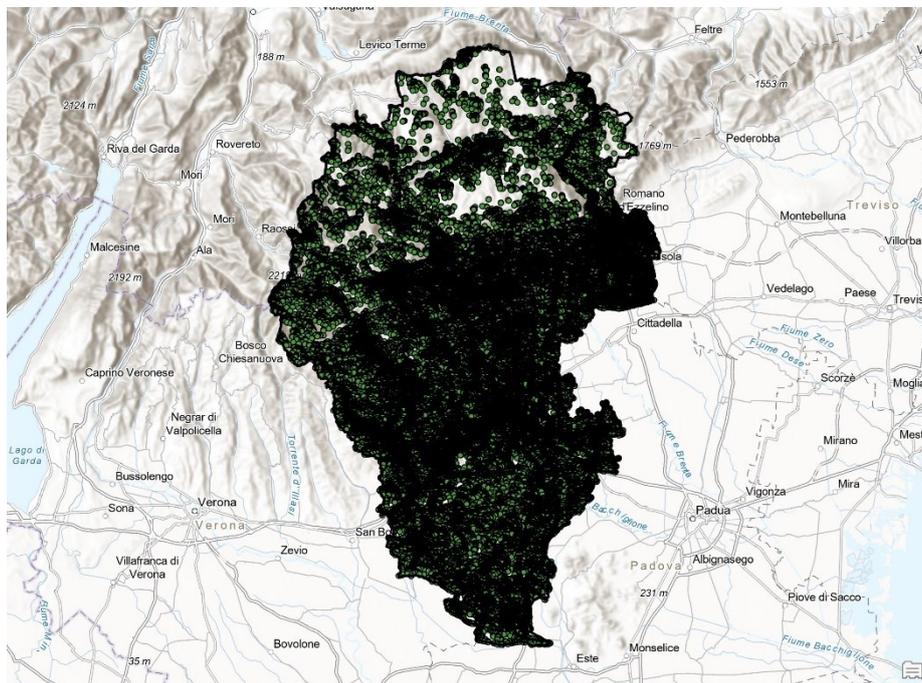


Fig 5.3.2 Orbita 095 IW3 2015-2021

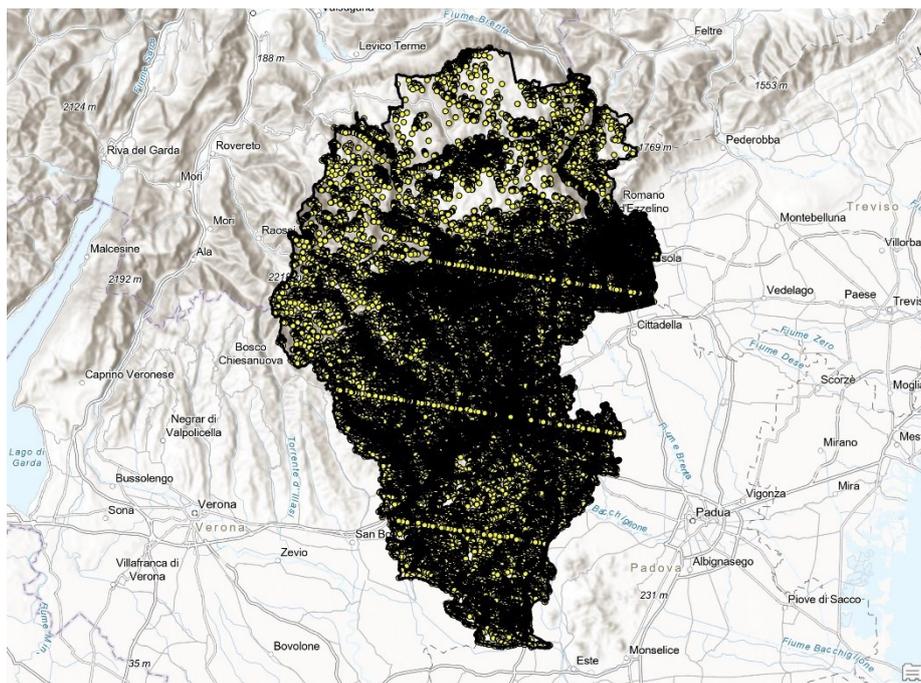


Fig 5.3.3 Orbita 168 IW1 2015-2021

2018-2022

- Orbita ascendente:
 - EGMS_L2b_117_0267_IW2_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_117_0268_IW2_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_117_0269_IW2_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_117_0270_IW2_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_117_0271_IW2_VV_2018_2022_1

Risulta l'orbita n°117 con swath IW2, come rappresentato nella Figura 5.3.4.

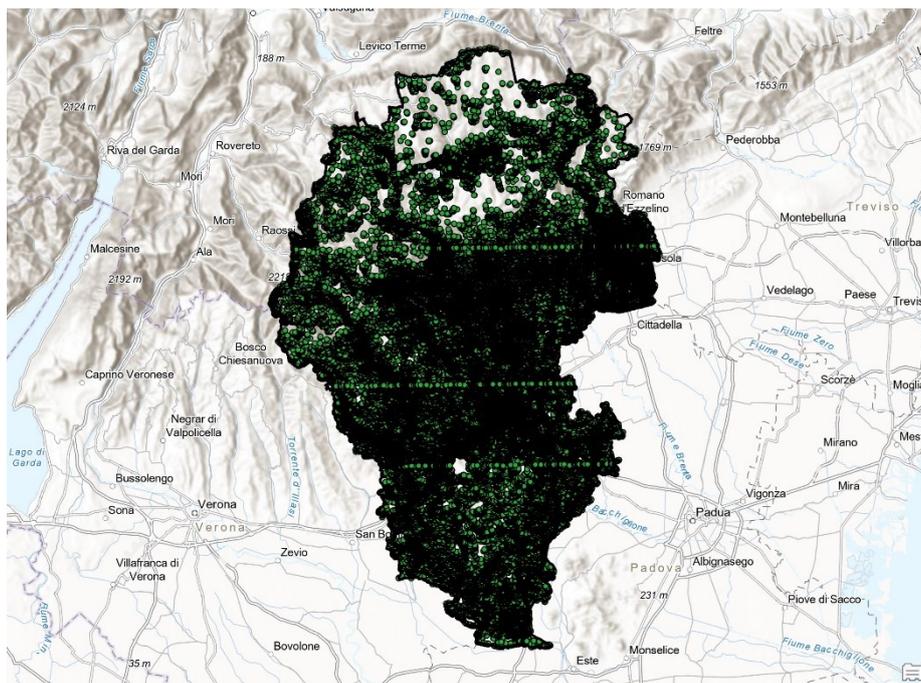


Fig 5.3.4 Orbita 117 IW2 2018-2022

- **Orbita discendente:**
 - EGMS_L2b_095_0801_IW3_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_095_0802_IW3_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_095_0803_IW3_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_095_0804_IW3_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_095_0805_IW3_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_095_0806_IW3_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_168_0800_IW1_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_168_0801_IW1_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_168_0802_IW1_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_168_0803_IW1_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_168_0804_IW1_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_168_0805_IW1_VV_2018_2022_1

Nell'orbita discendente sono stati individuati e scaricati i dati di due orbite che ricoprono l'intera area di studio: la 095 (Figura 5.3.5) e la 168 (Figura 5.3.6).



Fig 5.3.5 Orbita 095 IW3 2018-2022

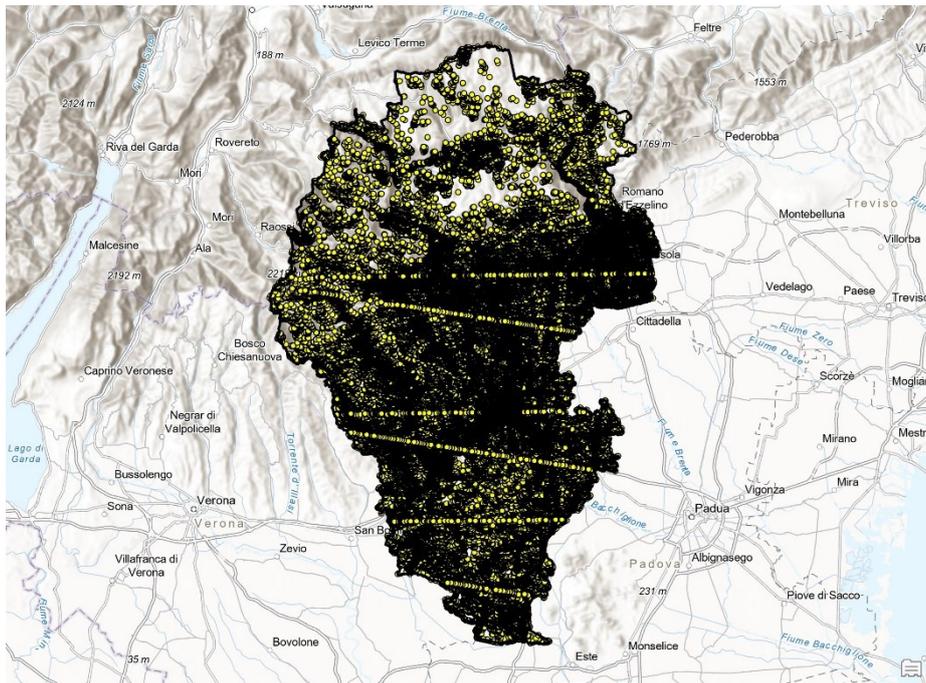


Fig 5.3.6 Orbita 168 IW1 2018-2022

5.4 Toscana

Dal servizio EGMS, sono stati scaricati sempre i prodotti Calibrati che occupano l'area delimitata dal Bacino del Reno nell'arco del periodo 2015-2021 e 2018-2022.

2015-2021

- Orbita ascendente:
 - EGMS_L2b_015_0256_IW3_VV
 - EGMS_L2b_015_0257_IW3_VV
 - EGMS_L2b_015_0258_IW3_VV
 - EGMS_L2b_015_0259_IW3_VV
 - EGMS_L2b_117_0259_IW1_VV
 - EGMS_L2b_117_0259_IW2_VV
 - EGMS_L2b_117_0260_IW1_VV
 - EGMS_L2b_117_0260_IW2_VV
 - EGMS_L2b_117_0261_IW1_VV
 - EGMS_L2b_117_0261_IW2_VV

La zona di studio è ricoperta da due orbite, la n° 015 e la 117, con la differenza che la prima presenta un solo swath, IW3 (Figura 5.4.1), mentre la seconda IW1 e IW2 (Figura 5.4.2).

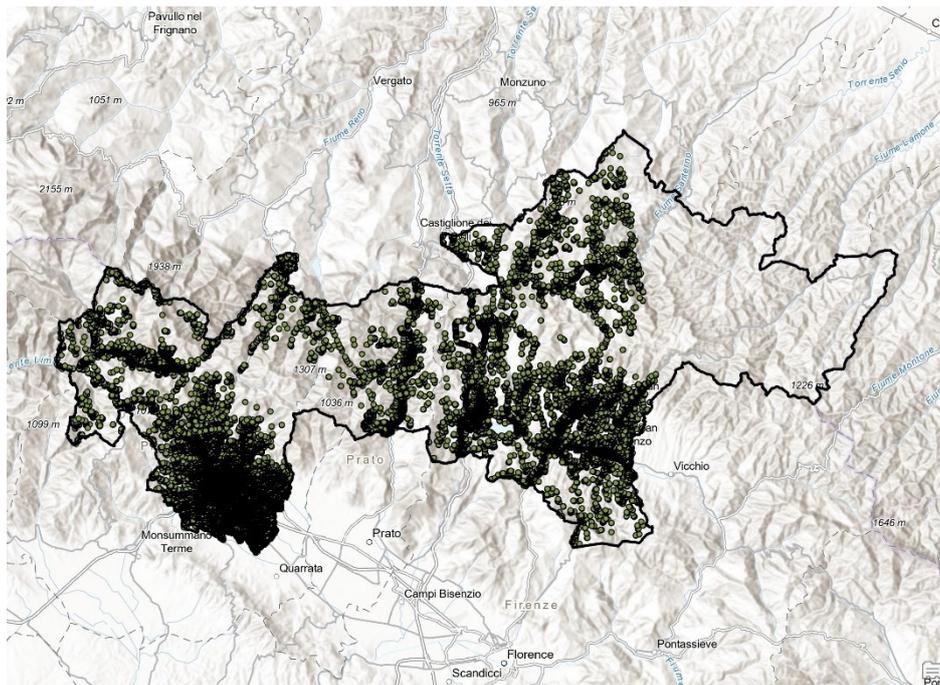


Fig 5.4.1 Orbita 015 IW3 2015-2021

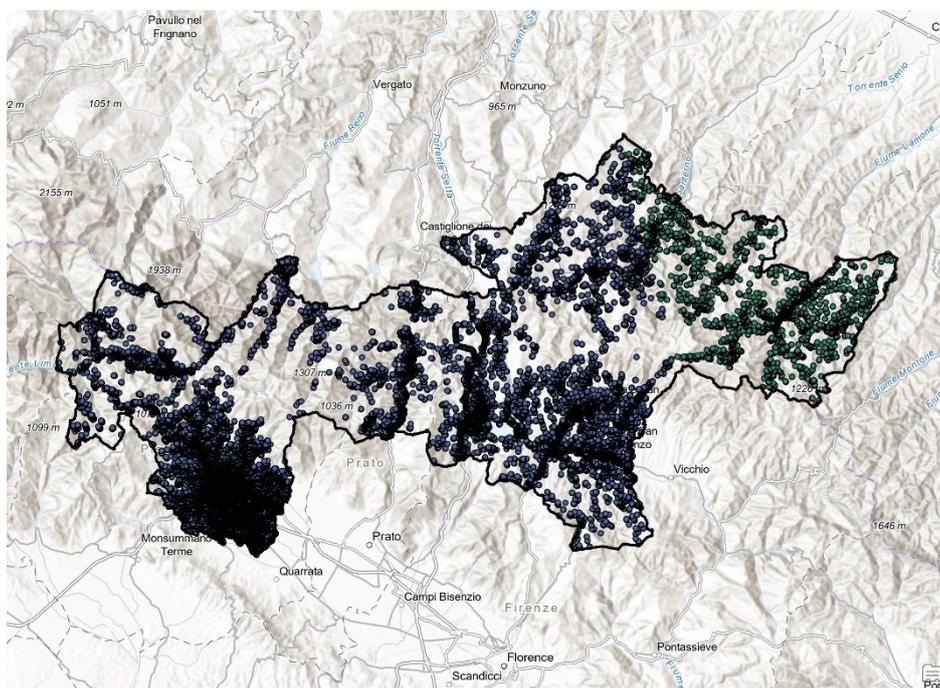


Fig 5.4.2 Orbita 117 IW1 e IW2 2015-2021

Per ottenere un unico dataset dell'orbita 117, si prosegue all'unificazione delle due scansioni, come mostrato nella Figura 5.4.3.

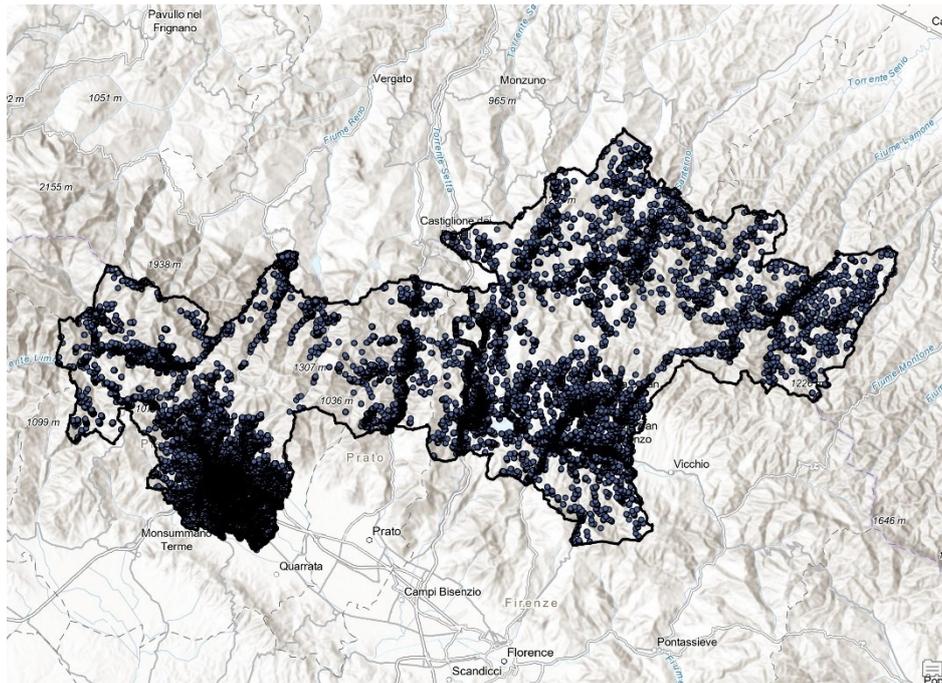


Fig 5.4.3 Orbita 117 IW1 e IW2 unificate 2015-2021

- Orbita discendente:
 - EGMS_L2b_095_0812_IW2_VV
 - EGMS_L2b_095_0812_IW3_VV
 - EGMS_L2b_095_0813_IW2_VV
 - EGMS_L2b_095_0813_IW3_VV
 - EGMS_L2b_095_0814_IW2_VV
 - EGMS_L2b_095_0814_IW3_VV
 - EGMS_L2b_095_0815_IW2_VV
 - EGMS_L2b_095_0815_IW3_VV
 - EGMS_L2b_168_0810_IW1_VV
 - EGMS_L2b_168_0811_IW1_VV
 - EGMS_L2b_168_0812_IW1_VV
 - EGMS_L2b_168_0813_IW1_VV
 - EGMS_L2b_168_0814_IW1_VV

Vengono coinvolte le orbite 095 e 168 per l'ara di studio, la prima con due scansioni, IW2 e IW3 (Figura 5.4.4) che poi verranno mostrate in un unico dataset con il passaggio dell'unificazione (Figura 5.4.5), e la seconda con un singolo swath, IW1 (Figura 5.4.6).

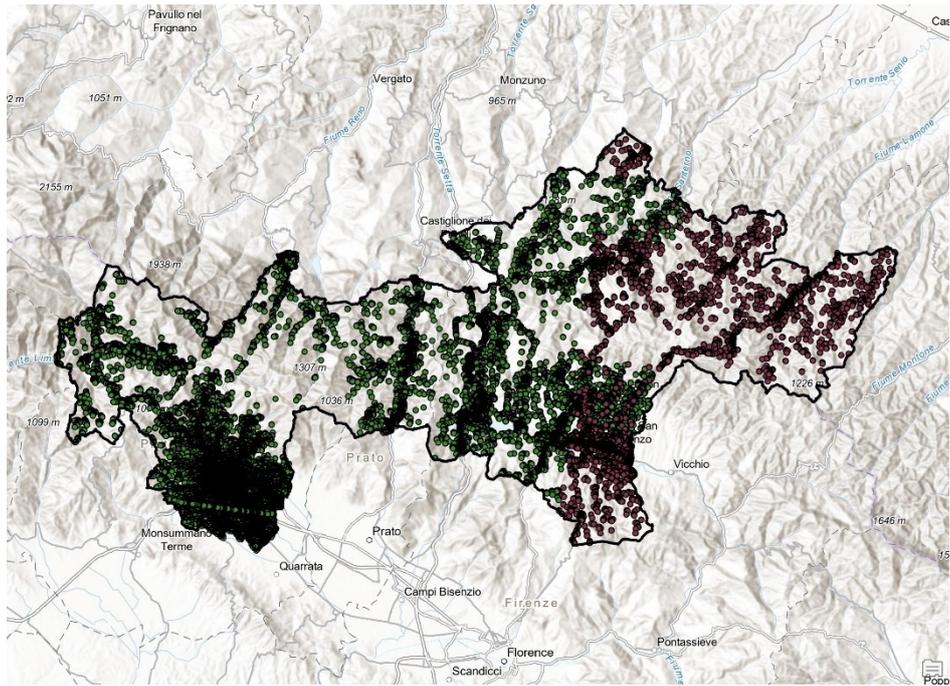


Fig 5.4.4 Orbita 095 IW2 e IW3 2015-2021

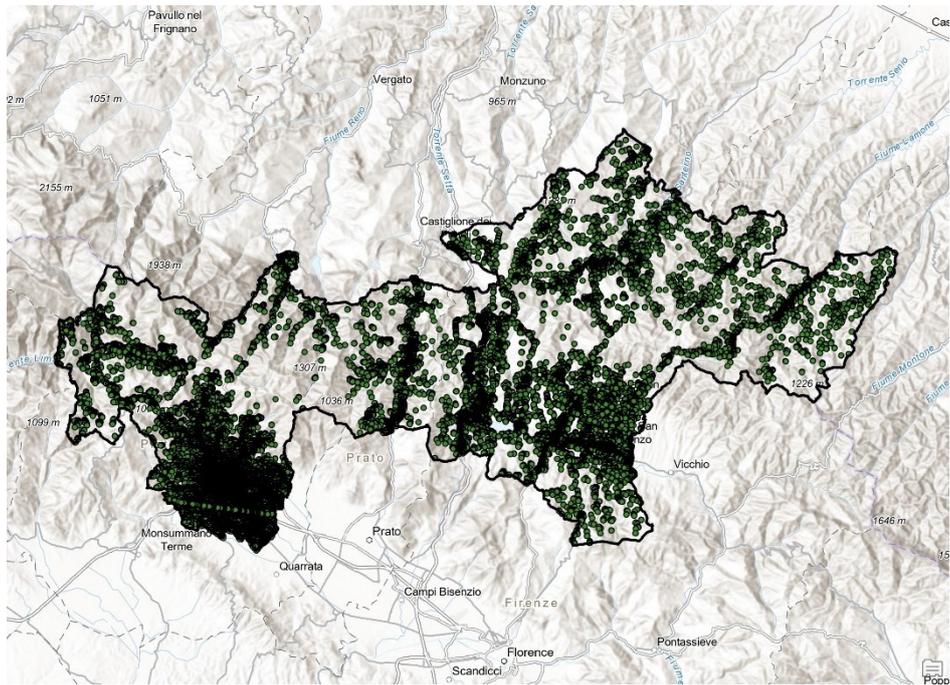


Fig 5.4.5 Orbita 095 IW2 e IW3 assemblate 2015-2021

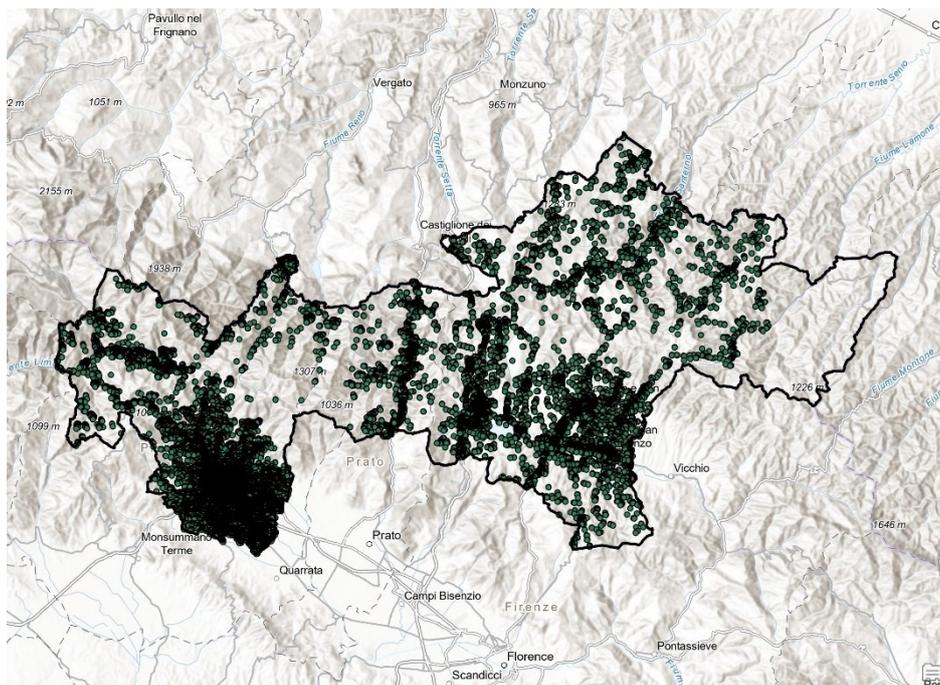


Fig 5.4.6 Orbita 168 IW1 2015-2021

2018-2022

- Orbita ascendente:
 - EGMS_L2b_015_0256_IW3_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_015_0257_IW3_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_015_0258_IW3_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_015_0259_IW3_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_117_0258_IW2_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_117_0259_IW1_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_117_0259_IW2_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_117_0260_IW1_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_117_0260_IW2_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_117_0261_IW1_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_117_0261_IW2_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_117_0262_IW1_VV_2018_2022_1

Sono state coinvolte due orbite ascendenti: la n° 015 con un'unica scansione (Figura 5.4.7) e la n° 117 con due scansioni (Figura 5.4.8).

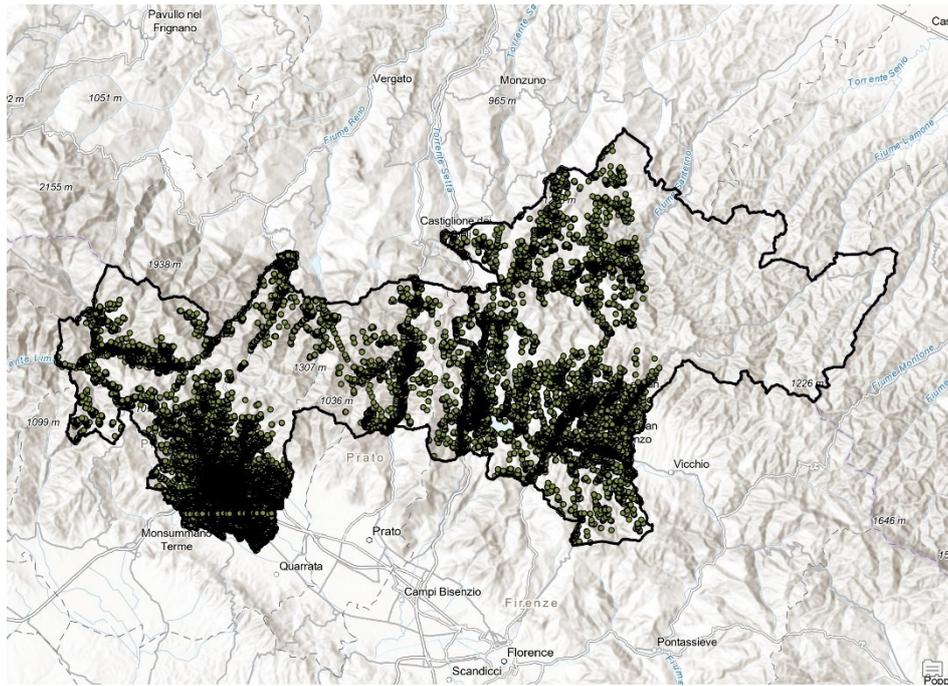


Fig 5.4.7 Orbita 015 IW3 2018-2022

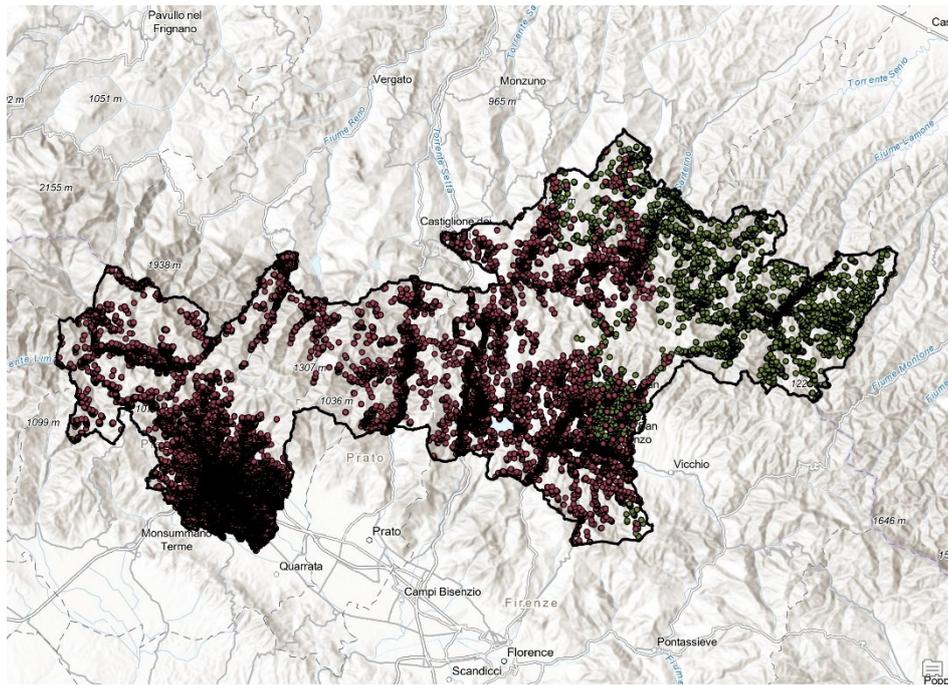


Fig 5.4.8 Orbita 117 IW1 e IW2 2018-2022

Si esegue lo stesso passaggio di unire le scansioni dell'orbita 117 per ottenere un unico dataset (Figura 5.4.9).

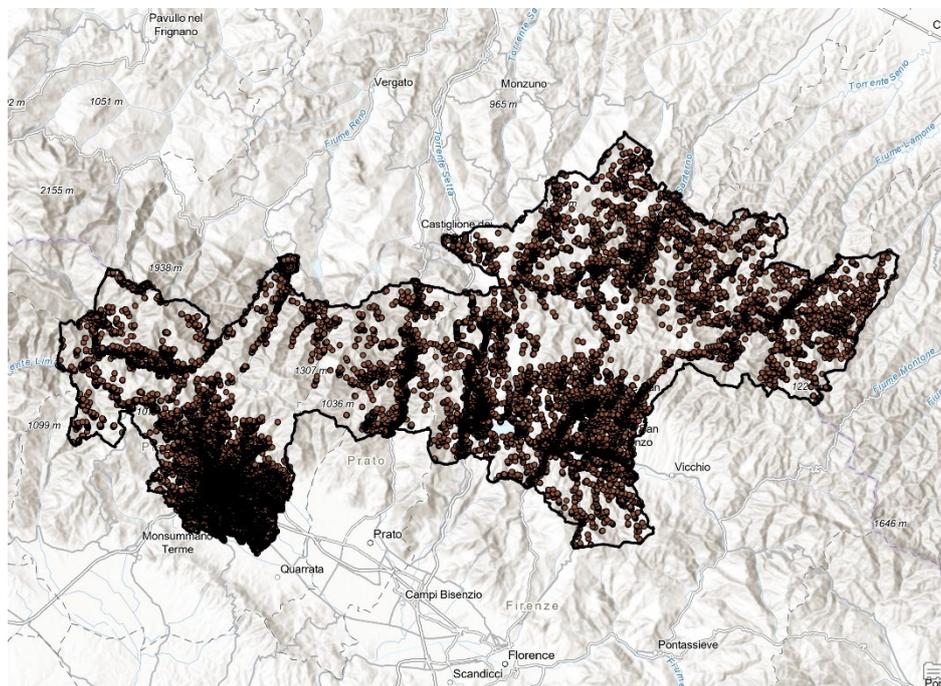


Fig 5.4.9 Unificazione di IW1 e IW2 dell'orbita 117 2018-2022

- Orbita discendente:
 - EGMS_L2b_095_0812_IW2_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_095_0812_IW3_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_095_0813_IW2_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_095_0813_IW3_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_095_0814_IW2_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_095_0814_IW3_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_095_0815_IW2_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_095_0815_IW3_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_168_0811_IW1_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_168_0812_IW1_VV_2018_2022_1
 - EGMS_L2b_168_0813_IW1_VV_2018_2022_1

Sono presenti due swath dell'orbita discendente 095 (Figura 5.4.10) e una sola per la 168 (Figura 5.4.11).

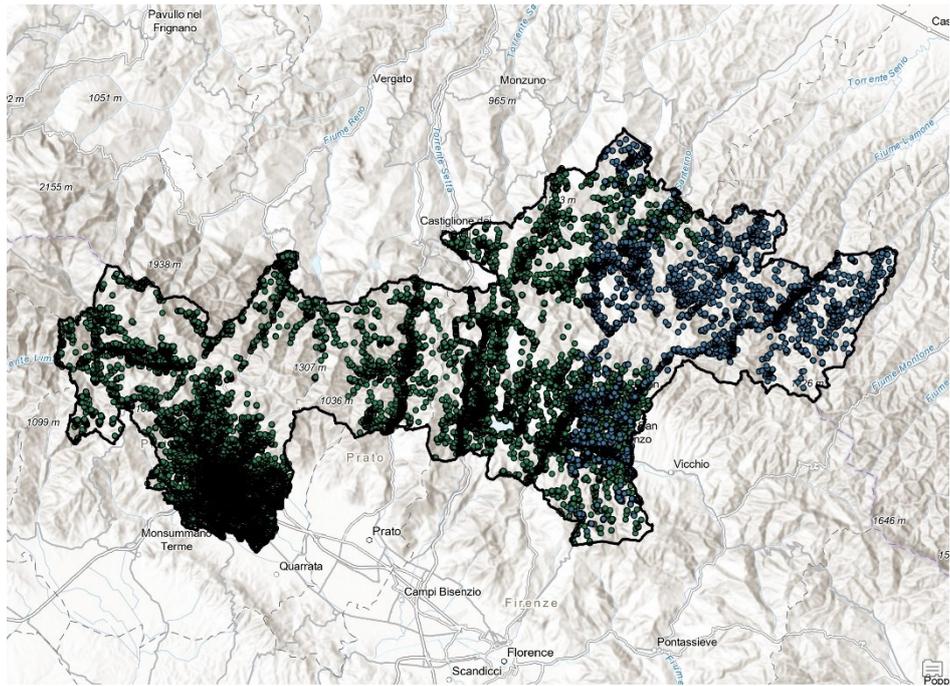


Fig 5.4.10 Orbita 095 IW2 e IW3 2018-2022

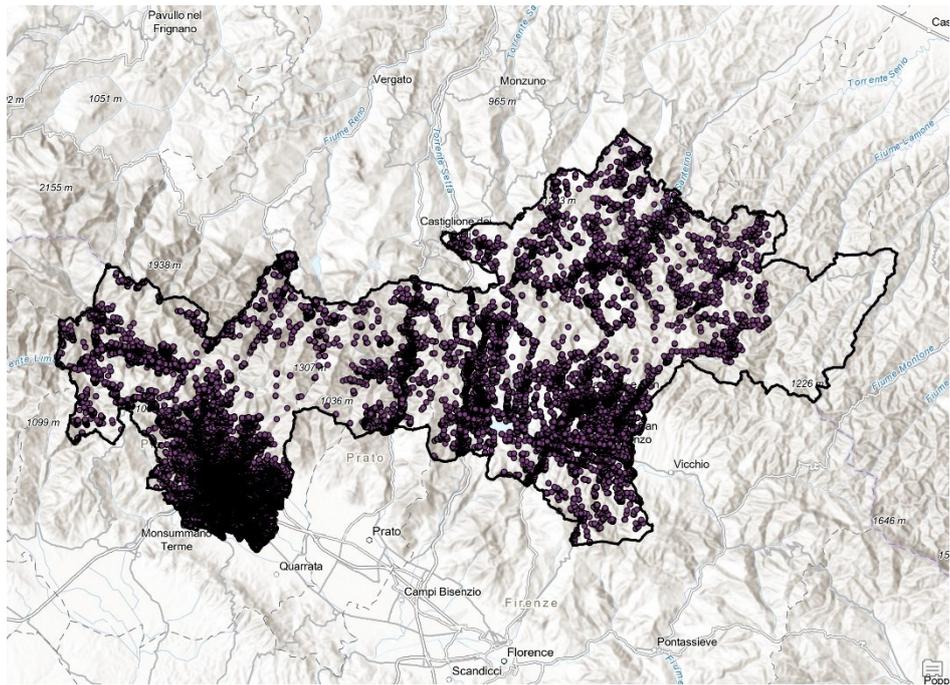


Fig 5.4.11 Orbita 168 IW1 2018-2022

I swath della 095 sono stati raggruppati in un unico dataset, come illustrato nella Figura 5.4.12.

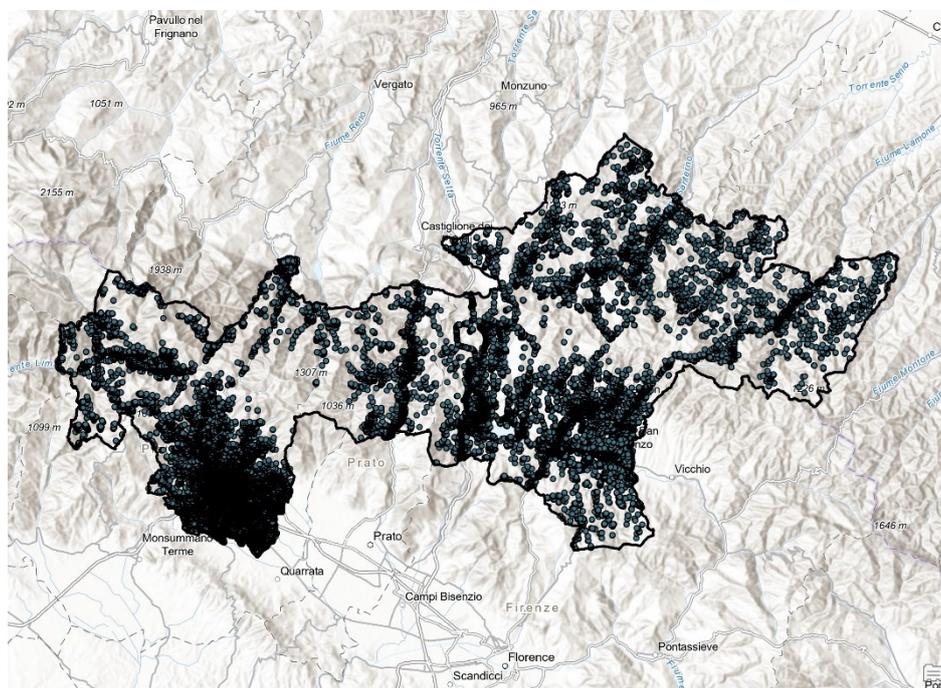


Fig 5.4.12 Orbita 095 con IW2 e IW3 assemblati 2018-2022

6. Analisi

6.1 Punti EGMS

Facendo uso del programma di ArcGIS Pro, il lavoro sul progetto diventa più fluente. Con riguardo alla visualizzazione della distribuzione dei punti, la loro posizione e comprensione dalle mappe quali sono i fattori che implicano la loro posizione.

Dopo aver scaricato i prodotti calibrati dal sito EGMS ed averli importati sul software è stata fatta la proiezione degli MP al fine di avere le unità di misure idonee per le statistiche successive. Con il sistema di proiezione UTM Zone 32N si ottengono misurazioni precise in metri. I dati vengono utilizzati in modo strategico per poter lavorare in modo ordinato, come per esempio la suddivisione dei file in due gruppi a seconda del periodo che coprono e scrivere in modo chiaro il nominativo nei successivi layer, per evitare confusione.

I punti che appartengono alle aree di studio vengono selezionati ed esportati per ottenere un layer contenente solo i punti della zona d'interesse, mentre gli MP che si trovano al di fuori vengono scartati. È un'operazione che va eseguita per ogni singola orbita, sia ascendente che discendente, come per tutti i passaggi a venire, poiché ognuna di esse ha diversi angoli di vista e di conseguenza differenti MP con valori propri.

Il comando *Kernel Density* analizza le variazioni locali della densità, evidenziando aree con più concentrazioni maggiori o minori di punti, proiettando una distribuzione spaziale sulla mappa. È un'operazione che viene eseguita per ogni orbita e tutte proiettano in modo simile lo stesso risultato, come illustrato nella Figura 6.1.1 un esempio dell'esito di un'orbita.

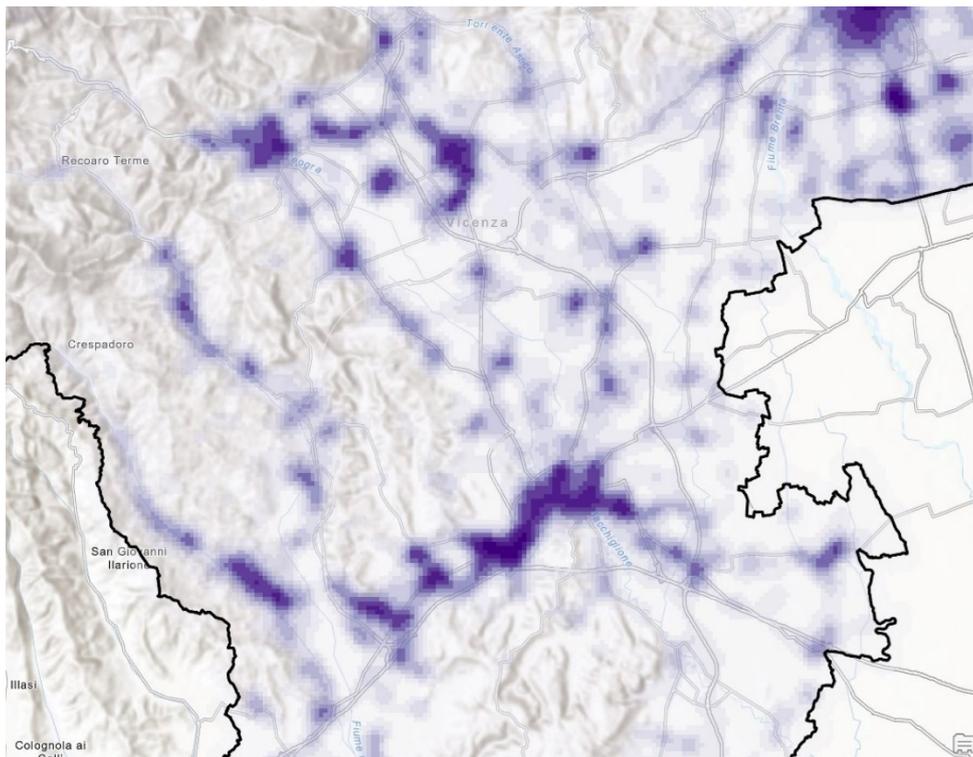


Fig 6.1.1 Layer Kernel Density della Provincia di Vicenza. Le aree evidenziate di viola scuro indicano maggiore concentrazione dei punti, mentre quelle chiare una minore concentrazione

Utilizzando il comando *Zonal Statistics as Table*, si possono prendere in considerazione diversi campi importanti dalla tabella degli attributi, come la somma, la media ed il max/min dei punti all'interno dell'area.

Per una migliore comprensione della distribuzione spaziale, l'area di interesse può essere suddivisa in poligoni in base all'elevazione. Il Modello Digitale del Terreno è utile, perché fornisce una rappresentazione tridimensionale del terreno e permette di creare delle mappe tematiche per descrivere l'altitudine. La soglia posta a 600 metri slm permette di distinguere due ambienti diversi e viene utilizzata per classificare il modello in due categorie di riferimento con il comando *Reclassify*: montagna e pianura. In questo modo vengono effettuate delle statistiche sulla densità dei punti di misurazione in due paesaggi differenti fra loro e fornire un'interpretazione più chiara. Essendo un raster il risultato finale, viene eseguita la conversione in formato di poligoni con il comando *Raster to Polygon* (Figura 6.2.1).

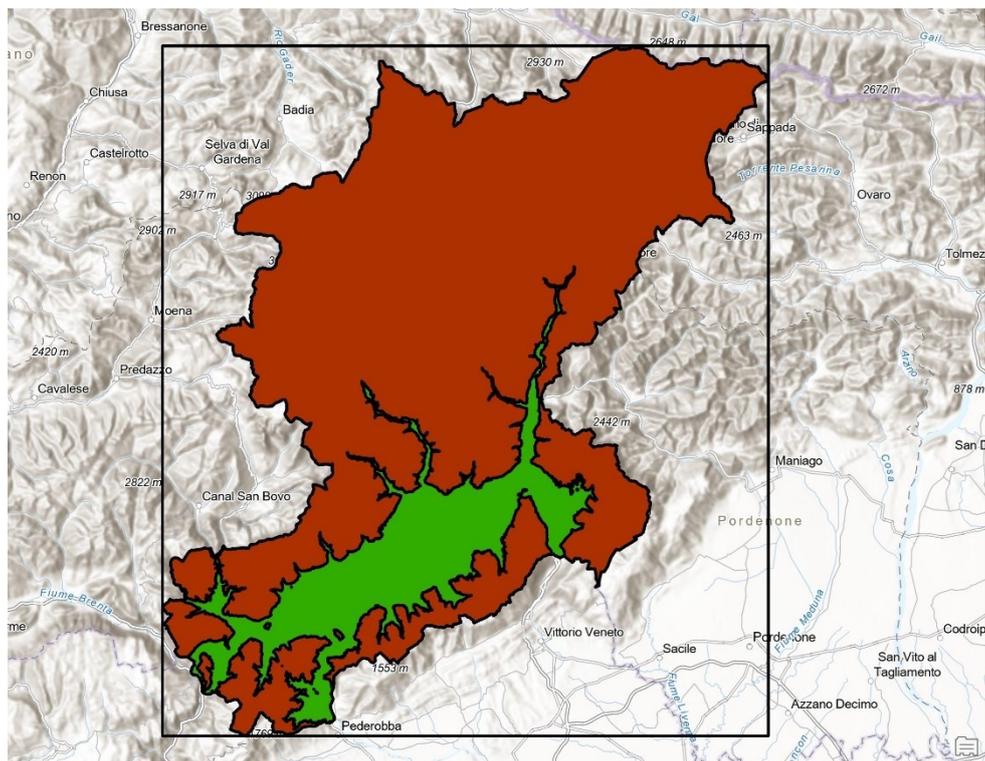


Fig 6.1.2 DTM riclassificato in due classi: pianura, in verde, e montagna, in marrone con i rispettivi poligoni

Grazie al layer appena creato, è stato possibile utilizzare il comando *Intersect* per eseguire l'individuazione degli MP all'interno dei poligoni, in modo da riuscire ad avere una visualizzazione visiva, come illustrato nella Figura 6.1.3.

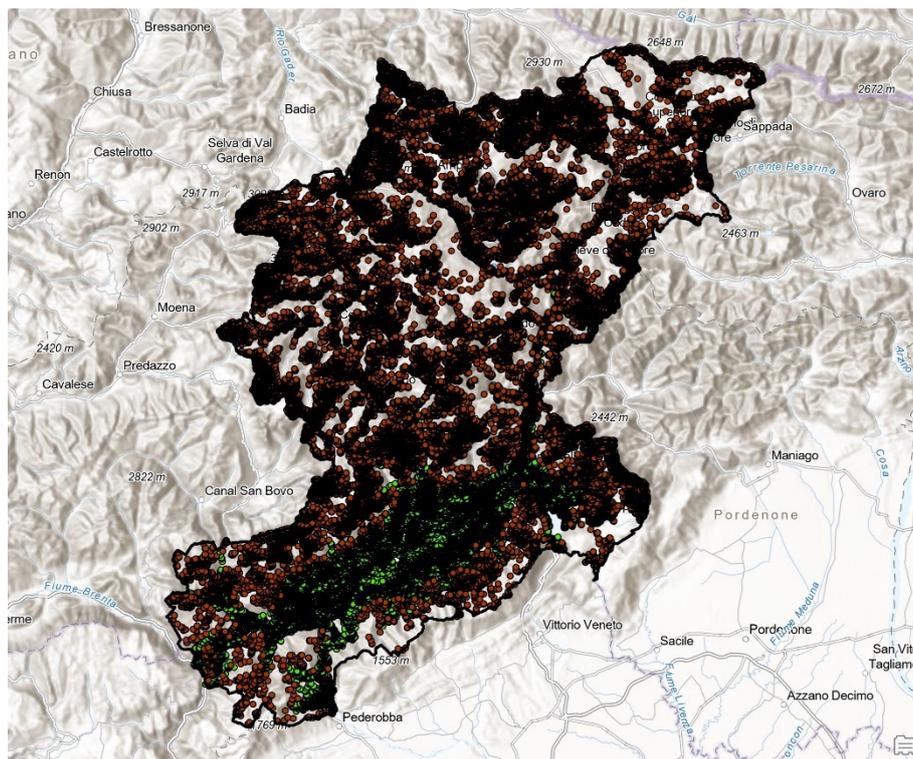


Fig 6.1.2 MP appartenenti a due classi diverse grazie alla differente simbologia

Inoltre qui è possibile utilizzare il comando *Kernel Density* per vedere dove si trovano la maggior parte dei punti di misura nell'area di studio e quindi utilizzare il comando *Zonal Statistics as Table* per mostrare le statistiche nella tabella.

Il principio di visualizzazione dei dati, dal punto di vista della coerenza temporale, è identico a quello visualizzato per la densità. Le pianure, essendo caratterizzate da terreni lisci e senza grandi variazioni topografiche, presentano moltissimi punti di elevata qualità rispetto a quelli presenti in montagna, perché la presenza di pendenze ripide e rilievi complessi genera ombre e variazioni nell'incidenza di segnale. Si può creare un nuovo layer, convertendo gli MP in un raster con il valore della coerenza come file di output. In questo modo è possibile applicare una classificazione dei punti in base alla qualità dei dati con il comando *Reclassify* e conteggiare quanti appartengono a quella determinata classe nella sua tabella (Figura 6.1.3).

È importante conoscere la qualità dei dati, perché permette all'utente di adottare un approccio diverso a seconda dei dati che utilizza. Se sono bassi di qualità, è necessario combinare i dati EGMS con altre fonti per identificare aree di instabilità del terreno. Persino i valori di qualità media non sono esattamente affidabili ed è sempre meglio non

trattarli singolarmente. Il Manuale d'Uso del Servizio EGMS consiglia fortemente di considerare la coerenza temporale che abbia un valore a partire da 0.7.

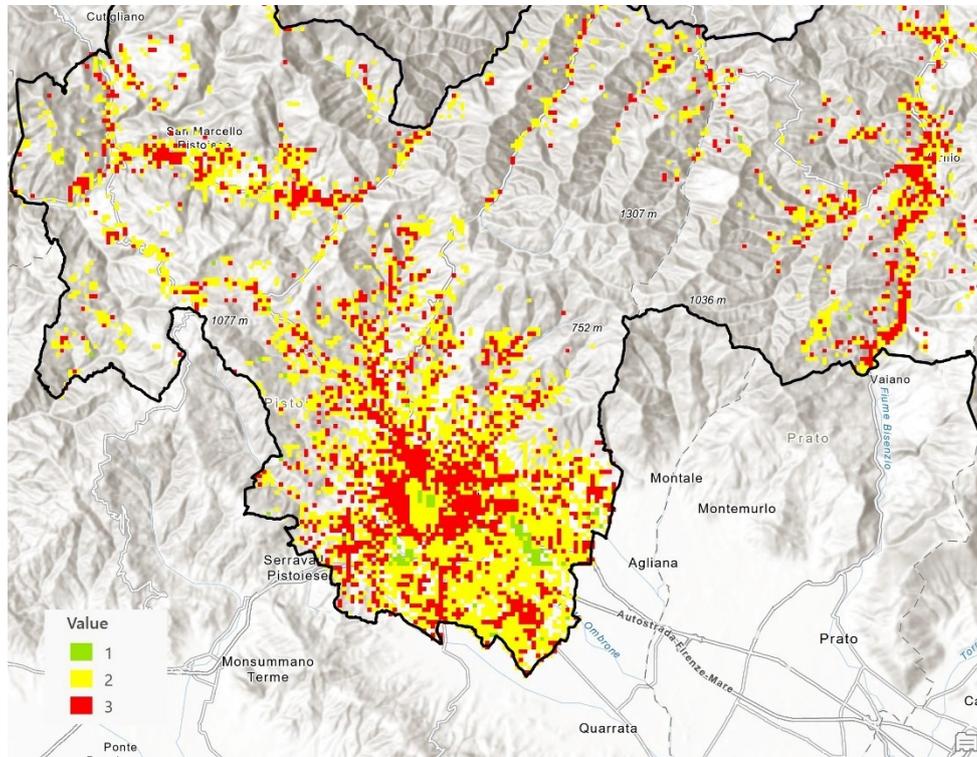


Fig 6.1.3 Rappresentazione della coerenza temporale in base alla qualità dei dati sulla città di Pistoia. Qualità bassa indicata con il colore verde (valore della coerenza temporale < 0.40), quella media con il giallo (coerenza temporale < 0.70) ed infine alta qualità corrisponde al rosso (valore < 0.99)

6.2 Frane IFFI

I poligoni corrispondenti alle zone interessate dalle frane vengono scaricati dal Geoportale della Regione del Veneto in contemporanea con i dati dell'IFFI. *Summarize Within* è un comando che sovrappone uno strato poligonale con un altro livello per riassumere il numero di punti, la lunghezza delle linee o l'area dei poligoni all'interno di ciascun poligono e calcola le statistiche del campo degli attributi dei punti contenuti all'interno dei poligoni. Con tale comando si individuano i punti che si trovano all'interno dei poligoni e grazie al *Select By Attributes* si possono selezionare tutte le aree che hanno almeno un punto all'interno di esse ed esportarle come un nuovo layer. Da qui, all'interno della tabella, è possibile visualizzare diverse statistiche, come il conteggio totale dei punti

e l'area complessiva di tutte le frane. Tali dati devono essere riportati per il passaggio successivo che consiste nel determinare la densità media complessiva dei punti all'interno delle frane.

$$\text{Densità media complessiva} = \frac{\text{Totale punti EGMS}}{\text{Area totale delle frane}}$$

Il risultato esprime il numero di punti per m² ed applicando l'espressione ad ogni singola orbita si notano valori molto bassi. Facilitandone l'interpretazione si può esprimere la densità in punti per ettaro, prendendo il risultato appena ottenuto e moltiplicandolo per 10.000 m².

$$\text{Densità in punti per ettaro} = \text{Densità media complessiva} \cdot 10.000$$

Indagando più in profondità, si potrebbero conoscere più dettagli sugli MP di ogni orbita all'interno delle frane. Prima di proseguire con il progetto, viene stabilito un valore minimo di 5 punti EGMS all'interno dei poligoni per motivi statistici e metodologici legati alla qualità ed all'affidabilità dell'analisi. Un numero minimo di punti è necessario per garantire che i dati siano rappresentativi del fenomeno e la capacità di verificarlo potrebbe risultare limitata con meno di 5 punti. Il valore di 5 è una soglia comunemente utilizzata per bilanciare accuratezza e significatività. Per cui si creano dei nuovi layer che hanno i poligoni di frana a partire da 5 punti in su per ogni orbita.

Il *Summarize Within* calcola il campo della velocità media all'interno delle frane, stabilendo le statistiche che si vogliono determinare, ad esempio la media, la massima/minima e la deviazione standard. È interessante studiare questo aspetto perché avendo a che fare con poligoni che hanno un differente numero di punti e velocità, ognuno di essi ha la propria personalità e può essere interpretato grazie alle statistiche.

Sempre con il layer dei poligoni che contengono almeno 5 punti, insieme alle orbite viene creato un nuovo layer di punti che appartengono ad essi, perché si deve trattare ogni MP singolarmente e non ogni singolo poligono. Si applica una selezione per distinguere le misurazioni in base al valore di velocità.

-5 mm/y < Vm < 5 mm/y	Frane stabili
Vm < -5 mm/y o Vm > 5 mm/y	Frane instabili

Grazie all'impostazione della soglia è possibile creare una mappa che rappresenti lo stato di attività dei punti EGMS, cambiando la simbologia per ciascuna classe di attività ed inattività.

Per fare una statistica su quante frane stabili ed instabili ci sono, si procede con il comando di *Kernel Density* e poi con lo *Zonal Statistics as Table*, per estrarre i campi che servono per determinare la distribuzione. Prima di procedere all'espressione, bisogna convertire tutti i valori dell'area da m² a km².

$$\text{Percentuale} = \frac{\text{Densità media} \cdot \text{Area totale frane}}{\text{Area della zona di studio}} \cdot 100$$

L'area della zona di studio si può ricavare dalla tabella nella sezione *Shape_Area*.

L'interazione tra punti EGMS e dati da altre fonti consente di creare mappe tematiche diverse e di effettuare statistiche con attributi diversi. Questi risultati sono indispensabili per una lettura da due punti di vista differenti e per dare una descrizione completa e un'interpretazione coerente della situazione nell'area di studio in esame.

7. Risultati e discussione

7.1 Belluno

Dalla rappresentazione spaziale dei punti di ciascuna delle orbite ascendenti e discendenti dei periodi 2015-2021 e 2018-2022 si nota che la maggior parte degli MP si concentra principalmente nelle città, proprio perché c'è un elevato numero di elementi artificiali, come ad esempio edifici, strade, etc., che sono ottimi riflettori radar stabili. Nella Figura 7.1.1 si può vedere come le città di Belluno, Feltre e nella zona vicino Pederobba, in basso, siano colorate di viola, grazie all'elevata concentrazione degli MP in queste aree.

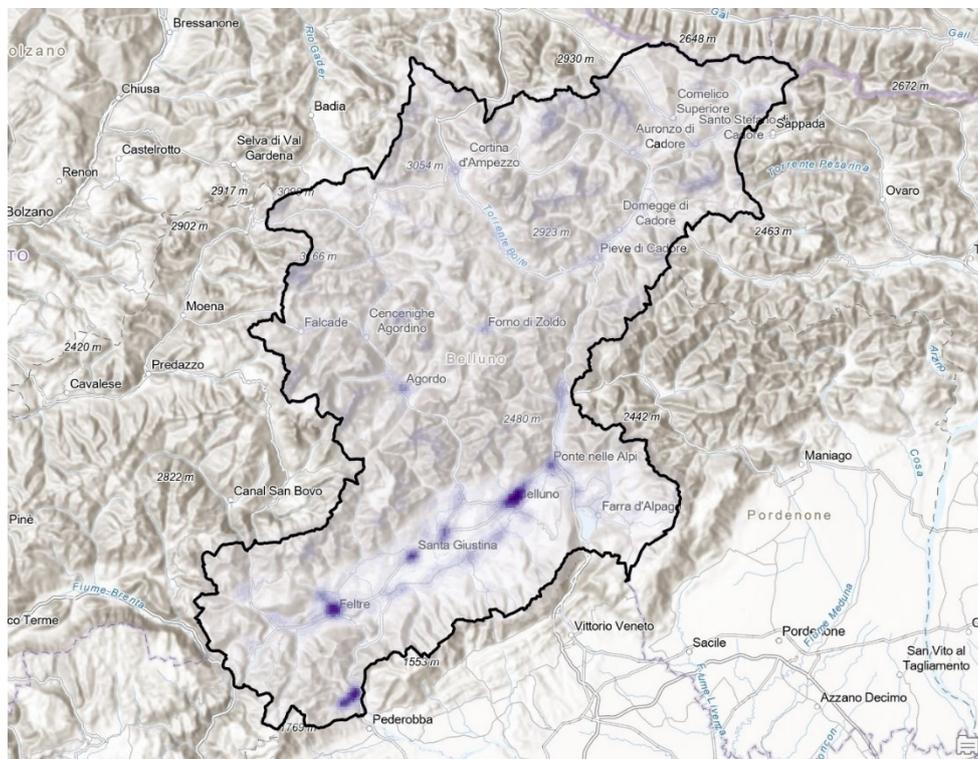


Fig 7.1.1 Mappa della distribuzione spaziale degli MP di un'orbita sulla Provincia di Belluno

Riprendendo la mappa che include i poligoni delle zone interessate da frane scaricati dall'IFFI, nella sezione 4.1, la maggior parte delle aree di dissesto si trova nella parte settentrionale e soprattutto occidentale. Questo indica che se si sovrappone la mappa a quella appena ottenuta, si nota che in queste zone c'è una minore concentrazione di MP, cioè all'interno di una cella di scansione ci possono essere meno punti e posti a distanze maggiori, rispetto alle aree urbanizzate dove ce ne sono molti di più e vicini fra di loro.

Questo significa che ci sono meno dati per analizzare i movimenti del suolo in dettaglio, e diventa più difficile quando si tratta di poligoni con aree più ampie.

Ad esempio, disponendo di un poligono di piccole dimensioni e di alcuni punti di misurazione, è possibile creare uno scenario corretto della situazione attraverso i campi dati, mentre nel caso di un'area di grandi dimensioni con pochi punti subentra l'incertezza.

Le tabelle 7.1.1 e 7.1.2 mostrano i risultati della densità media indicate con la sigla *Dm*, espressa in punti per chilometro quadrato, nella Provincia di Belluno per ogni orbita ascendente e discendente in entrambi i periodi di aggiornamento, con i rispettivi istogrammi (Figura 7.1.2 e 7.1.3).

Densità media in pt/km ²				
2015-2021				
Orbita	Ascendenti		Discendenti	
N°orbita	Orbita 044	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Dm	203,18	362,45	280,75	179,39

Tab. 7.1.1 Densità media in pt/km² del periodo 2015-2021

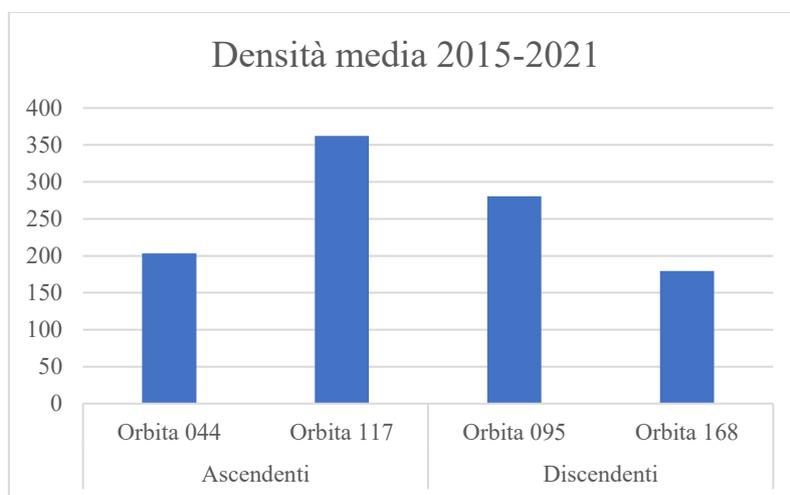


Fig 7.1.2 Istogramma della densità media 2015-2021

Densità media in pt/km ²			
2018-2022			
Orbita	Ascendenti		Discendenti
N°orbita	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Dm	347,51	369,37	220,10

Tab. 7.1.2 Densità media in pt/km² del periodo 2018-2022

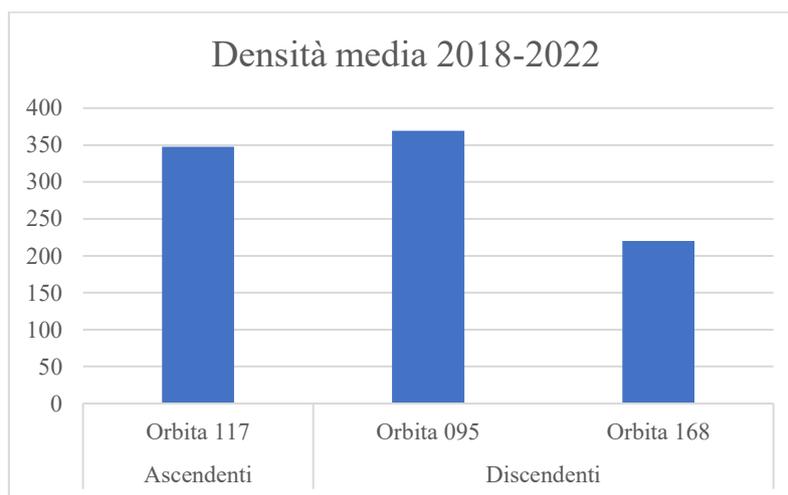


Fig 7.1.3 Istogramma della densità media 2018-2022

Le orbite 117 e 095 coinvolte nell'area di studio presentano ciascuna due swath, IW2 e IW3, quindi più punti di misurazione rispetto alle altre che ne possiedono solo uno, IW1. Per questo motivo, negli istogrammi e nelle tabelle si nota la differenza, specialmente nell'ultimo caso con i numeri.

Anche suddividendo l'area in pianura e montagna, vengono raccolti tantissimi punti di misurazione nei posti dove ci sono più riflettori radar, come si può dedurre dai numeri espressi nelle tabelle 7.1.3 e 7.1.4 e dalla variazione negli istogrammi (Figura 7.1.4 e 7.1.5).

Densità media in pianura e montagna in pt/km ²				
2015-2021				
Orbita	Ascendenti		Discendenti	
N°orbita	Orbita 044	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Pianura	468,96	722,07	568,43	356,16
Montagna	153,89	293,29	225,20	135,01

Tab. 7.1.3 Densità media in pt/km² in pianura e montagna del periodo 2015-2021

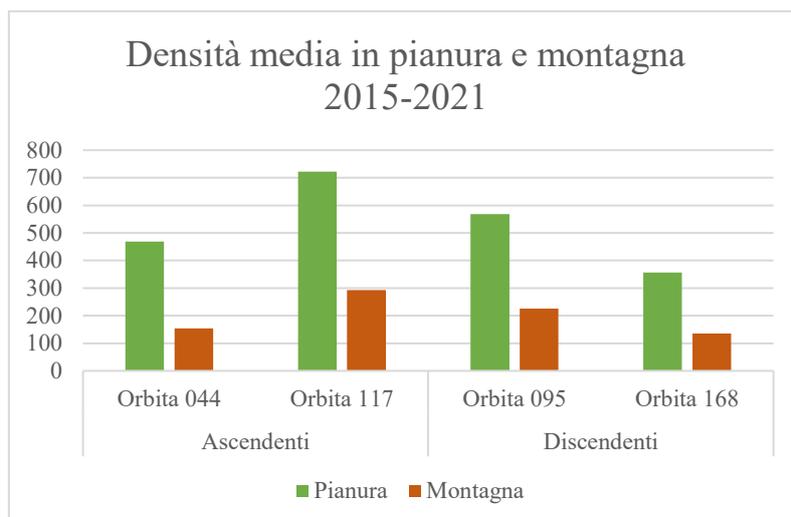


Fig 7.1.4 Istogramma della densità media in pianura e montagna del periodo 2015-2021

Densità media in pianura e montagna in pt/km ²			
2018-2022			
Orbita	Ascendenti	Discendenti	
N°orbita	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Pianura	790,23	755,59	434,54
Montagna	262,43	295,24	166,21

Tab. 7.1.4 Densità media in pt/km² in pianura e montagna del periodo 2018-2022

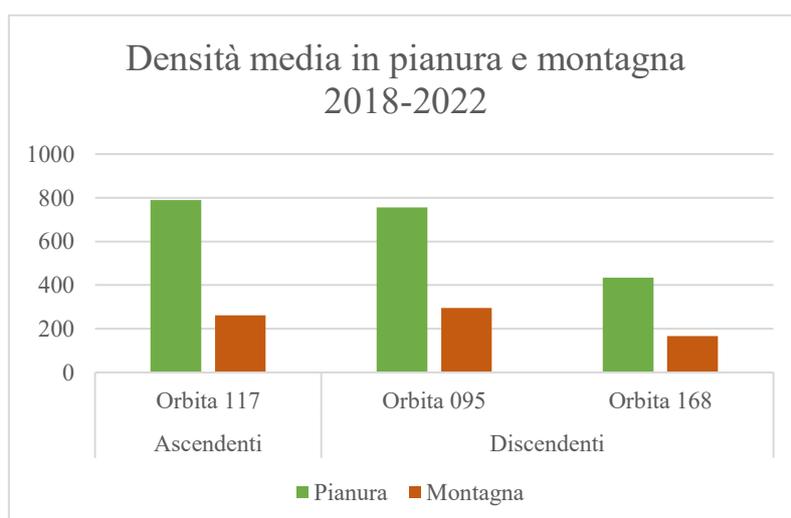
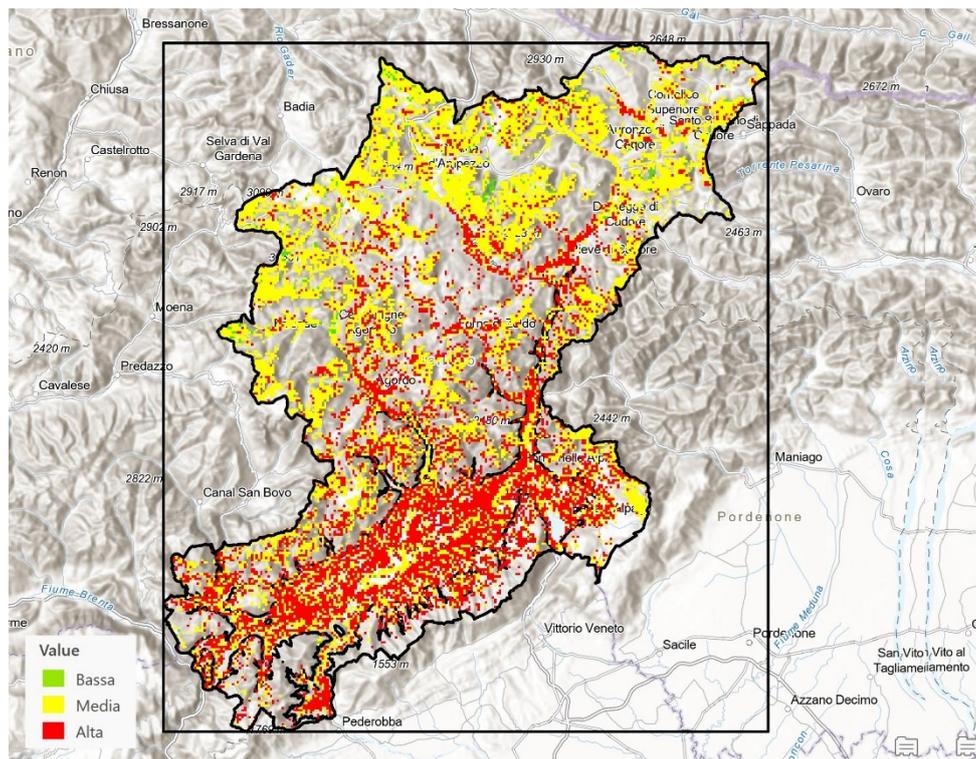


Fig 7.1.5 Istogramma della densità media in pianura e montagna del periodo 2018-2022

Facendo chiarezza, si ha a che fare con due periodi diversi fra di loro: 2015-2021 e 2018-2022. Il primo è un monitoraggio della durata di 7 anni, quando si determina la densità media vengono presi tutti i valori di quell'arco di tempo e fornisce risultati più ampi rispetto al secondo che tratta un periodo di tempo più breve e più concentrato. Poiché nel corso degli anni sono aumentate le costruzioni artificiali, le zone urbanizzate, etc., di conseguenza aumentano i riflettori radar stabili e questo influisce sul risultato finale della densità. Infatti, fra il primo ed il secondo aggiornamento, la concentrazione dei punti di misurazione in pianura vede un aumento significativo rispetto a quello registrato in montagna.

Andando ad analizzare la distribuzione spaziale della coerenza temporale, i dati con elevata qualità sono collocati lungo tutta la pianura, nella parte bassa della Provincia di Belluno. Anche la presenza degli edifici, strade e terreni agricoli contribuiscono a tale fenomeno di maggiorazione, perché le loro superfici sono dei riflettori radar stabili che riflettono bene il segnale.

Per comprendere meglio la collocazione degli MP, il Modello Digitale del Terreno riclassificato in pianura e montagna viene integrato al layer della coerenza per avere una visuale più chiara della loro posizione in determinati paesaggi e quanto l'ambiente può influenzare tanto sulla qualità dei dati, rendendoli affidabili o meno (Figura 7.1.6).



*Fig 7.1.6 Distribuzione spaziale della coerenza temporale sulla Provincia di Belluno in aree distinte fra pianura e montagna
(Qualità Bassa < 0.40, Qualità Media < 0.70, Qualità Alta < 0.99)*

Per determinare le aree di dissesto collocate nelle zone montane non si possono trattare singolarmente i dati interferometrici perché, come mostrato nella mappa e come si potrà notare dalle tabelle di seguito, ci sono molti punti di qualità media. È necessario integrarli con altri dati geologici, topografici, morfologici, etc. Nel caso dei dati ad elevata qualità, essi cadono nell'area di pianura dove si presenta una situazione dinamicamente più stabile, quindi ottimi candidati per l'interpretazione del movimento del suolo.

Esaminando il layer della coerenza, si conosce il conteggio totale dei punti appartenenti alle diverse qualità, come mostrato nelle tabelle (Tabella 7.1.5 e 7.1.6). I dati che presentano una coerenza al di sotto del valore di 0.4 sono da tralasciare, in quanto non sono affidabili e, analizzando le tabelle, non costituiscono una presenza importante rispetto ai dati con una qualità media tra 0.4 e 0.7.

Coerenza temporale				
2015-2021				
Orbita	Ascendenti		Discendenti	
N°orbita	Orbita 044	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Bassa	130 (0,72%)	343 (1,75%)	236 (1,28%)	414 (17,21%)
Media	11163 (61,65%)	13911 (70,91%)	10841 (59%)	11370 (47,27%)
Alta	6812 (37,63%)	5460 (27,84%)	7301 (39,72%)	8555 (35,52%)

Tab. 7.1.5 N° di punti appartenenti alle diverse classi di qualità del periodo 2015-2021
(Qualità Bassa < 0.40, Qualità Media < 0.70, Qualità Alta < 0.99)

Coerenza temporale			
2018-2022			
Orbita	Ascendenti	Discendenti	
N°orbita	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Bassa	139 (0,73%)	1205 (5,96%)	846 (3,77%)
Media	13292 (69,67%)	13952 (68,97%)	14051 (62,58%)
Alta	5642 (29,60%)	5067 (25,07%)	7550 (33,65%)

Tab. 7.1.6 N° di punti appartenenti alle diverse classi di qualità del periodo 2018-2022
(Qualità Bassa < 0.40, Qualità Media < 0.70, Qualità Alta < 0.99)

Interagendo i dati EGMS con i poligoni che corrispondono alle zone interessate da frane, si possono ottenere dei valori riguardo la densità media complessiva dei punti per tutta l'area totale delle aree interessate da dissesti. I valori dell'area riportati in tabella sono espressi in m², perciò nella densità complessiva si parla di numeri molto bassi, dato che si stanno lavorando su aree molto ampie (Tabella 7.1.7 e 7.1.8).

Per calcolare la somma di tutti i punti appartenenti ai poligoni abbiamo la *Sum counts*, mentre la *Sum Area* è l'area totale di tutti i poligoni correlativi alle zone interessate dalle frane espressa in m². Infine per *D complex* si intende la densità complessiva, cioè il numero di punti per metro quadrato dell'area totale dei poligoni corrispondono alle aree di frane. L'ultima riga fa riferimento alla densità stessa, ma espressa per ettaro.

Densità nelle frane a partire da almeno 1 punto nei poligoni				
2015-2021				
Orbita	Ascendenti		Discendenti	
N°orbita	Orbita 044	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Sum Counts	15717	30350	26529	11744
Sum Area	53945985,59	59484022,80	55347240,33	38670984,23
D complex (punti/m ²)	0,00029	0,00051	0,00047	0,00030
Densità (punti/ettaro)	2,91	5,10	4,79	3,03

Tab. 7.1.7 Densità complessiva delle frane all'interno della Provincia di Belluno in relazione al periodo 2015-2021

Densità nelle frane a partire da almeno 1 punto nei poligoni			
2018-2022			
Orbita	Ascendenti		Discendenti
N°orbita	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Sum Counts	27714	33588	14109
Sum Area	59408482,85	58488721,02	40718477,80
D complex (punti/m ²)	0,00046	0,00057	0,00034
Densità (punti/ettaro)	4,66	5,74	3,46

Tab. 7.1.8 Densità complessiva delle frane all'interno della Provincia di Belluno in relazione al periodo 2018-2022

Analizzando in dettaglio le tabelle, le righe del totale dei punti e delle aree delle orbite stesse cambiano dei due periodi. Ad esempio, l'orbita 117 nel primo aggiornamento mostra numeri maggiori rispetto al secondo, poiché la concentrazione di punti in alcune zone di frana cambia anche nel periodo di tempo in esame e dal suo punto di vista sono stati registrati meno dati. Le orbite 095 e 168, al contrario, nonostante la riduzione del tempo di rilevamento sono stati acquisiti più MP all'interno delle zone franose molto probabilmente grazie al loro angolo di vista.

Specificando che quando un poligono non ha punti al suo interno, la sua area non è considerata nelle statistiche della somma delle aree di tutti i poligoni di frana. Quindi, se nel tempo viene rilevato un nuovo punto di misurazione all'interno di un poligono che in precedenza non ne aveva, viene presa in considerazione anche la sua area all'interno delle

statistiche. Si tratta di un'opera di costante aggiornamento tra i dati interferometrici e la visualizzazione di frane con cataloghi.

Dopo aver applicato la selezione degli MP in base alla soglia di minimo 5 punti per poligono, s'è determinata la stabilità in base alla velocità: se il valore della velocità media è compreso fra -5 mm/y e 5 mm/y si può definire stabile, mentre se è maggiore di 5 mm/y o minore di -5 mm/y è considerato instabile. Grazie alla simbologia è possibile distinguere i punti fra attivi ed inattivi nei due periodi di aggiornamento (Figura 7.1.7 e 7.1.8).

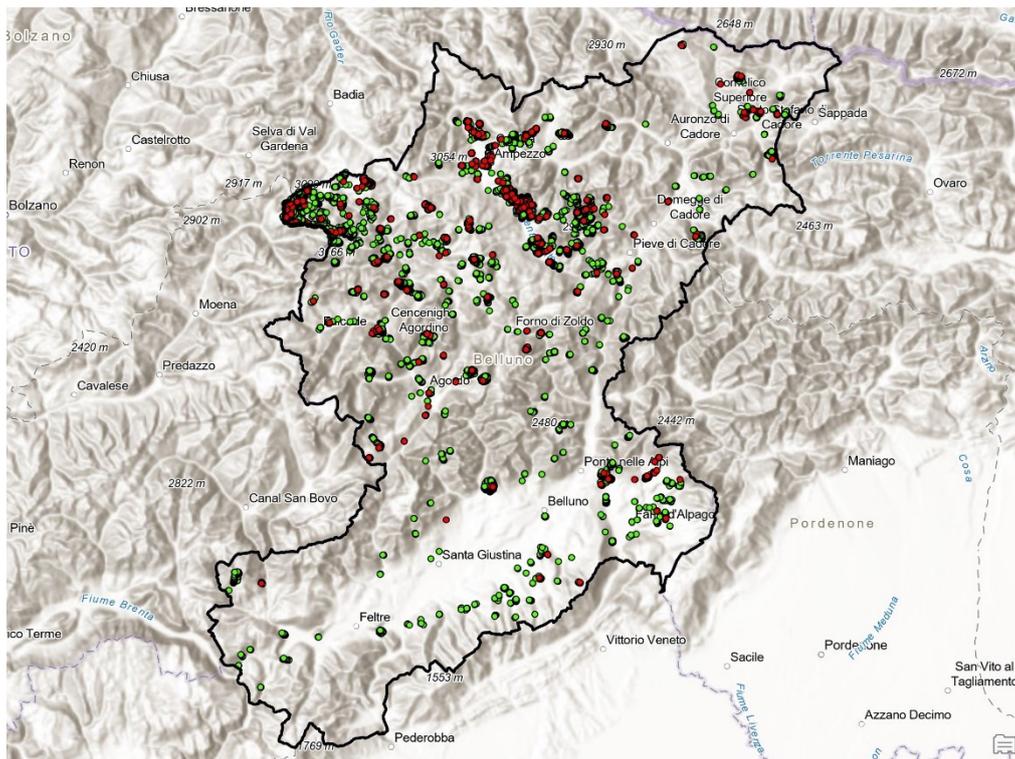


Fig 7.1.7 Punti stabili (verdi) ed instabili (rossi) della Provincia di Belluno nel periodo 2015-2021

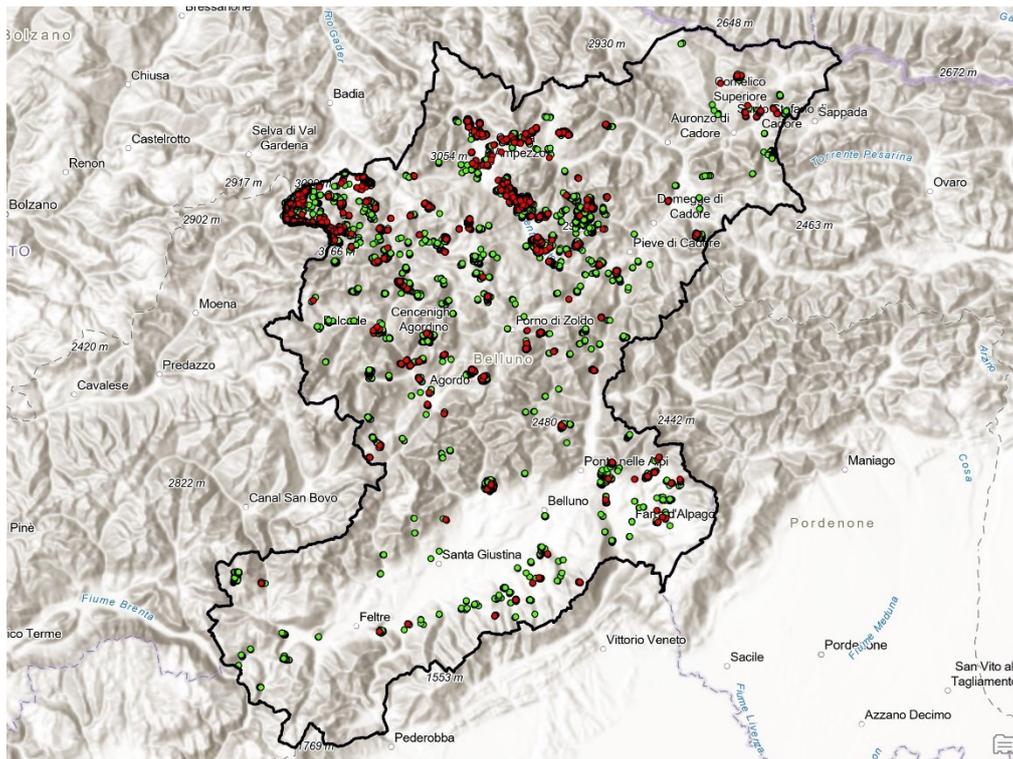


Fig 7.1.8 Punti stabili (verdi) ed instabili (rossi) della Provincia di Belluno nel periodo 2018-2022

Confrontando gli stati di attività nei due periodi, nel 2018-2022 è stato registrato per esempio, un aumento notevole di punti instabili nella zona settentrionale-occidentale dove sono collocate la maggior parte delle frane rilevate da IFFI, come indicato nella Figura 7.1.9.

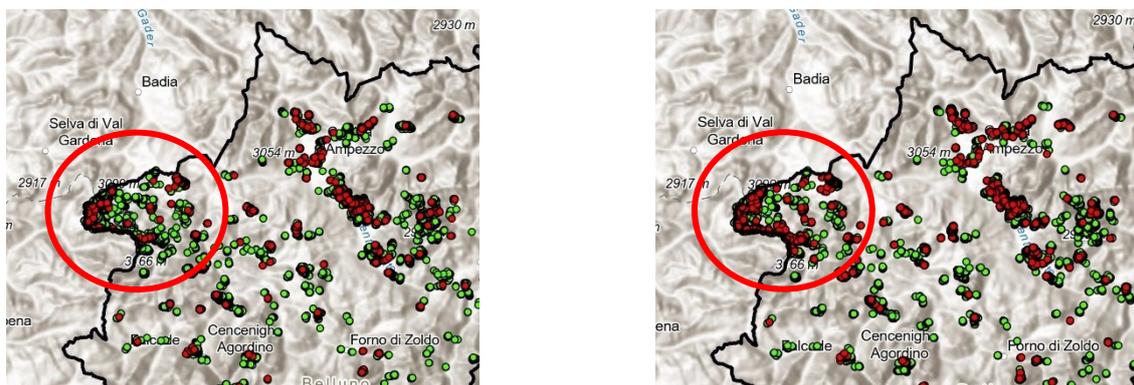


Fig 7.1.9 A sx il periodo 2015-2021, a dx il periodo 2018-2022. Si può notare un aumento dei punti instabili (rossi) nelle zone cerchiata

Anche nel comune di Cortina d'Ampezzo si è verificato un lieve aumento dei punti instabili e nella zona sottostante ad essa, vicino San Vito di Cadore. Quindi, con il nuovo aggiornamento si sono riscontrate nuove aree critiche da tenere sott'osservazione, mentre i nuovi punti instabili comparsi in zone insolite, come in pianura ne sono stati rilevati pochi, è necessario effettuare un controllo accurato per confermare se si sta effettivamente verificando un movimento importante o no.

Avere la possibilità di visualizzare lo stato di attività dalla simbologia in base alla sua stabilità ed instabilità risulta di grande aiuto per osservare l'evoluzione della situazione dal punto di vista dinamico ed utilizzare i dati dagli attributi per descrivere in maniera dettagliata il suo movimento. Infatti, dal confronto delle immagini è possibile determinare l'aumento delle zone a rischio frana e di conseguenza bisogna prestare attenzione, facendo delle previsioni ed adottando delle strategie per minimizzare i rischi insieme agli altri strumenti presenti sul suolo.

Qui vengono riportate le statistiche di stabilità ed instabilità per ogni orbita (Tabella 7.1.9, 7.1.10, 7.1.11 e 7.1.12). L'area di studio della Provincia di Belluno è pari a 3613.6 km². *Atot frane* fa riferimento all'area totale delle frane stabili ed instabili, mentre il *Dm* è la densità media dei punti per chilometro quadrato.

Densità media frane stabili in pt/km ²				
2015-2021				
Orbita	Ascendenti		Discendenti	
N°orbita	Orbita 044	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Atot frane	44042	50404	44574	26761
Dm	28,25	63,71	60,35	38,92
%	34,43	88,87	74,44	28,82

Tab. 7.1.9 Densità media delle frane stabili in pt/km² nella Provincia di Belluno 2015-2021

Densità media frane stabili in pt/km ²				
2018-2022				
Orbita	Ascendenti		Discendenti	
N°orbita	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168	
Atot frane	47853	47885	29321	
Dm	56,64	74,55	42,08	
%	75,01	98,79	34,14	

Tab. 7.1.10 Densità media delle frane stabili in pt/km² nella Provincia di Belluno 2018-2022

Densità media frane instabili in pt/km ²				
2015-2021				
Orbita	Ascendenti		Discendenti	
N°orbita	Orbita 044	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Atot frane	37177	42663	42370	23906
Dm	0,56	1,22	0,65	1,11
%	0,58	1,44	0,77	0,73

Tab. 7.1.11 Densità media nelle frane instabili in pt/km² nella Provincia di Belluno 2015-2021

Densità media frane instabili in pt/km ²				
2018-2022				
Orbita	Ascendenti		Discendenti	
N°orbita	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168	
Atot frane	44677	46443	27219	
Dm	1,20	1,44	2,22	
%	1,49	1,85	1,67	

Tab. 7.1.12 Densità media nelle frane instabili in pt/km² nella Provincia di Belluno 2018-2022

7.2 Vicenza

I punti di misurazione appartenenti ad entrambe le orbite ascendenti e discendenti dei due periodi, 2015-2021 e 2018,2022, sono maggiormente collocati nelle città di Vicenza, Bassano del Grappa, Thiene ed Arzignano (Figura 7.2.1).

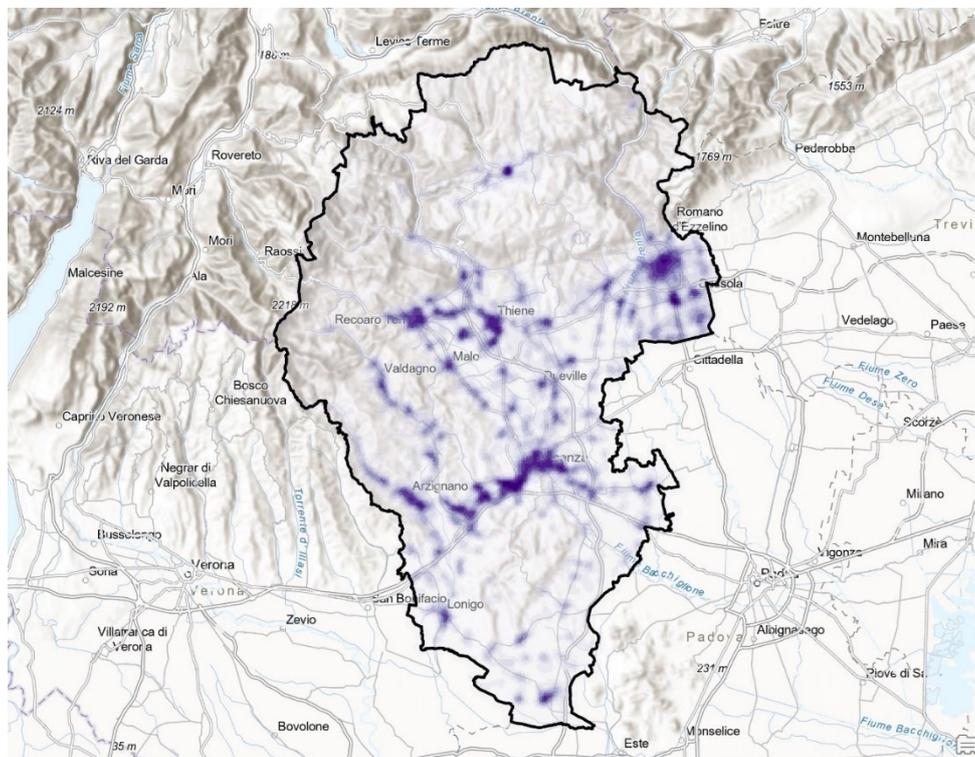


Fig 7.2.1 Mappa della distribuzione spaziale degli MP di un'orbita sulla Provincia di Vicenza

L'Inventario dei Fenomeni Franosi ha individuato i poligoni di frana collocati nella parte settentrionale-occidentale della Provincia di Vicenza, dove la presenza dei punti di misurazione scarseggia, come mostrato nella mappa della distribuzione spaziale degli MP. Questo potrebbe essere un piccolo intoppo, ma con degli accorgimenti, come incrociare i dati con altre informazioni come quelle geotecniche o pluviometriche e con lo studio della storicità delle frane è possibile riuscire a dare un'interpretazione più accurata.

L'aumento dell'urbanizzazione nei principali comuni ha portato all'aumento degli edifici e di altri elementi e quindi ad un accrescimento dei PS grazie al loro segnale radar costante nel tempo.

Le tabelle (Tabella 7.2.1 e 7.2.2) possono essere utilizzate per interpretare la densità media dei punti EGMS (Dm) in punti per chilometro quadrato nell'area della Provincia di Vicenza e i relativi istogrammi (Figura 7.2.2 e 7.2.3).

Densità media in pt/km ²			
2015-2021			
Orbita	Ascendenti	Discendenti	
N°orbita	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Dm	835,19	774,73	613,41

Tab. 7.2.1 Densità media in pt/km² del periodo 2015-2021

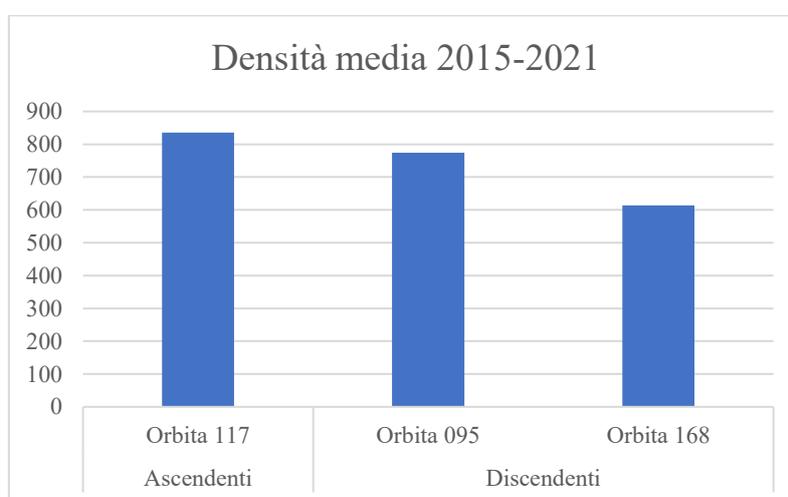


Fig 7.2.2 Istogramma della densità media 2015-2021

Densità media in pt/km ²			
2018-2022			
Orbita	Ascendenti	Discendenti	
N°orbita	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Dm	884,57	826,28	696,12

Tab. 7.2.2 Densità media in pt/km² del periodo 2018-2022

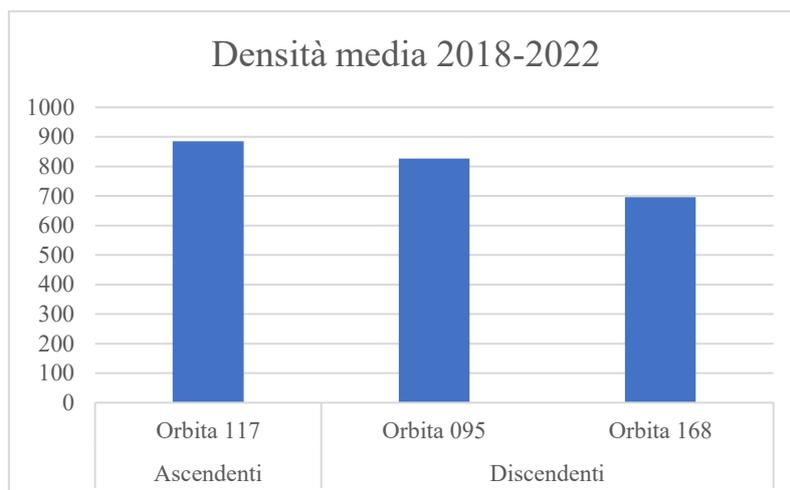


Fig 7.2.3 Istogramma della densità media 2018-2022

Negli istogrammi, come nelle tabelle, si evince una differenza fra l'orbita 168 con le orbite 1117 e 095. Questo perché sono state coinvolte le scansioni IW2 ed IW3 per le ultime orbite grazie ai loro angoli di vista leggermente vicini che hanno ricoperto l'intera Provincia di Vicenza. La 168, invece, aveva un solo swath e quindi ha prodotto meno punti di misurazioni, ma necessari per una continuità dei dati.

Come si può dedurre, dividendo l'area in pianure e montagne, c'è una maggiore densità in aree pianeggianti rispetto ad altitudini elevate come mostrato nelle tabelle (Tabella 7.2.3 e 7.2.4) e le marcate differenze tra le barre degli istogrammi (Figura 7.2.4 e 7.2.5).

Densità media in pianura e montagna in pt/km ²			
2015-2021			
Orbita	Ascendenti	Discendenti	
N°orbita	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Pianura	1178,46	1097,37	876,67
Montagna	166,52	146,33	101,69

Tab. 7.2.3 Densità media in pt/km² in pianura e montagna 2015-2021

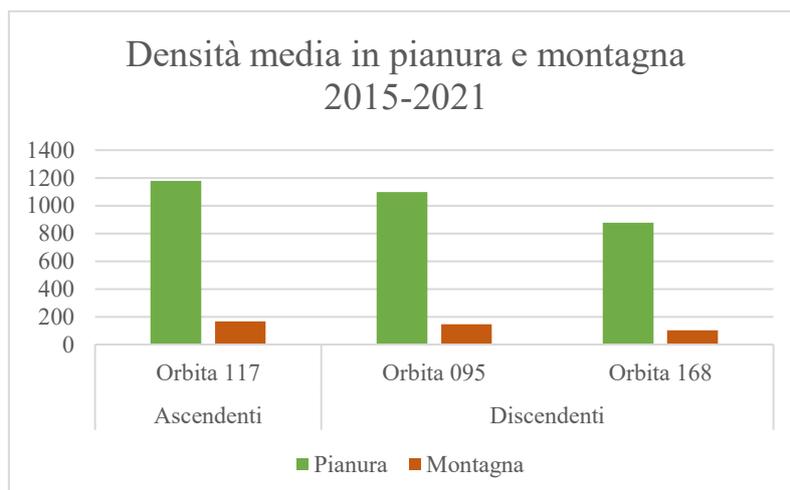


Fig 7.2.4 Istogramma della densità media in pianura e montagna 2015-2021

Densità media in pianura e montagna in pt/km ²			
2018-2022			
Orbita	Ascendenti	Discendenti	
N°orbita	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Pianura	1242,33	1162,85	991,48
Montagna	188,10	171,84	121,22

Tab. 7.2.4 Densità media in pt/km² in pianura e montagna del periodo 2018-2022

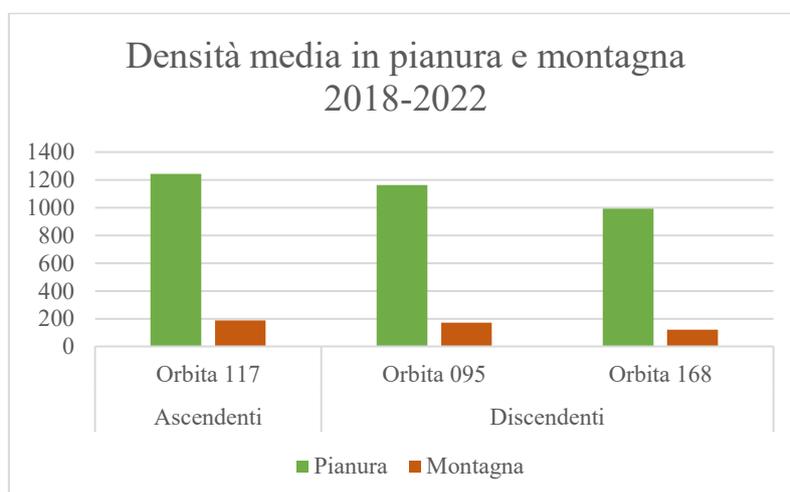
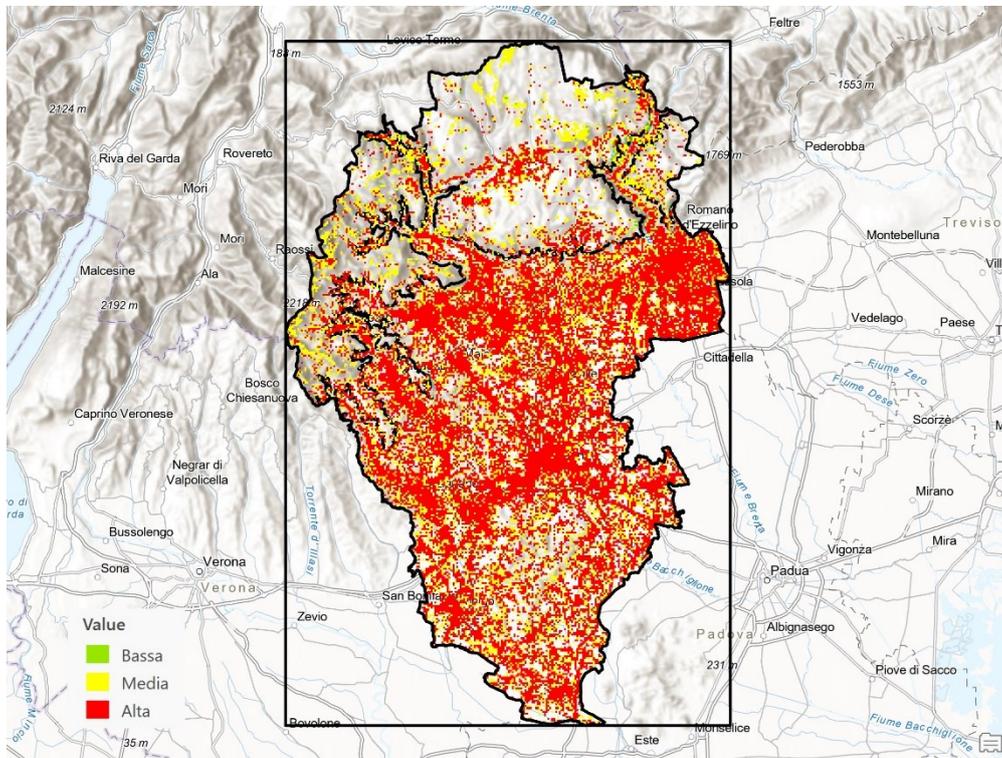


Fig 7.2.5 Istogramma della densità media in pianura e montagna del periodo 2018-2022

Rappresentando la Provincia di Vicenza con il Modello Digitale del Terreno, viene mostrata la predominanza della zona pianeggiante su quella montana collocatosi esclusivamente nella parte settentrionale. Di conseguenza, avendo un'area pianeggiante

molto elevata rispetto a quella di montagna e numerosi MP negli ambienti dove non presentano importanti pendenze, il risultato della densità finale va a favore della pianura. La coerenza temporale è ampiamente distribuita in tutta la zona al di sotto delle altitudini elevate, in pianura, come si evince immediatamente dalla Figura 7.2.6.



*Fig 7.2.6 Rappresentazione di una maggiore collocazione della coerenza temporale ad alta qualità nella zona di pianura della Provincia di Vicenza
(Qualità Bassa < 0.40, Qualità Media < 0.70, Qualità Alta < 0.99)*

Secondo il ragionamento della coerenza temporale, si ha la certezza di utilizzare i dati per monitorare il movimento del suolo negli altopiani grazie alla sua elevata affidabilità, mentre per le aree di dissesto occorre integrarli con altri materiali geologici dato che il segnale in queste zone non viene registrato in modo costante nel tempo. Con il nuovo aggiornamento, nonostante sia breve l'arco di tempo, vengono rilevate le stesse quantità di valori di media ed alta qualità, specialmente per le orbite 117 e 095.

Le tabelle riportate di seguito (Tabella 7.2.5 e 7.2.6) mostrano valori alti di elevata affidabilità rispetto a quelli di Belluno, dove invece predominano i punti di media qualità.

Coerenza temporale			
2015-2021			
Orbita	Ascendenti	Discendenti	
N°orbita	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Bassa	32 (0,10%)	13 (0,04%)	18 (0,06%)
Media	10457 (32,48%)	9780 (30,91%)	8211 (27,29%)
Alta	21688 (67,42%)	21852 (69,05%)	21848 (72,64%)

Tab. 7.2.5 N° di punti appartenenti alle diverse classi di qualità del periodo 2015-2021
(Qualità Bassa < 0.40, Qualità Media < 0.70, Qualità Alta < 0.99)

Coerenza temporale			
2018-2022			
Orbita	Ascendenti	Discendenti	
N°orbita	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Bassa	20 (0,06%)	72 (0,22%)	181 (0,57%)
Media	10781 (33,58%)	10783 (33,14%)	11047 (34,94%)
Alta	21323 (66,36%)	21789 (67,64%)	20485 (64,49%)

Tab. 7.2.6 N° di punti appartenenti alle diverse classi di qualità del periodo 2018-2022
(Qualità Bassa < 0.40, Qualità Media < 0.70, Qualità Alta < 0.99)

Le aree rilevate dall'IFFI come franose sono poche e di conseguenza facendo la somma totale delle aree di tutti i poligoni ed il complessivo degli MP si può immaginare di ottenere dei valori coerenti con l'area di studio in esame, dopo aver fatto il confronto con i valori visualizzati su Belluno.

Viene determinata la densità media complessiva (*D complex*) in punti per metro quadro per ogni orbita coinvolta (Tabella 7.2.7 e 7.2.8), con i valori della somma dei punti (*Sum counts*) e dell'area delle frane (*Sum Area*).

Calcolo densità nelle frane a partire da almeno 1 punto nei poligoni			
2015-2021			
Orbita	Ascendenti	Discendenti	
N°orbita	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Sum Counts	3390	3673	2418
Sum Area	8747597,65	9346183,23	9086152,50
D complex (punti/m ²)	0,00038	0,00039	0,00026
Densità (punti/ettaro)	3,87	3,93	2,66

Tab. 7.2.7 Densità complessiva delle frane all'interno della Provincia di Vicenza in relazione al periodo 2015-2021

Calcolo densità nelle frane a partire da almeno 1 punto nei poligoni			
2018-2022			
Orbita	Ascendenti	Discendenti	
N°orbita	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Sum Counts	3888	4538	3036
Sum Area	9314419,21	9537549,37	9541207,24
D complex (punti/m ²)	0,00041	0,00047	0,00031
Densità (punti/ettaro)	4,17	4,75	3,18

Tab. 7.2.8 Densità complessiva delle frane all'interno della Provincia di Vicenza in relazione al periodo 2018-2022

Nel 2018-2022 si registra un aumento in tutti i campi, grazie all'individuazione di nuovi punti di misurazione sia all'intero di poligoni esistenti, che all'interno di quelli che prima non sono stati ancora rilevati. Per esempio le orbite 117 e 168 hanno rilevato nuove aree franose e di conseguenza zone a rischio.

Dopo l'esportazione dei punti appartenenti ai poligoni che contengono almeno 5 punti, la stabilità viene determinata secondo la velocità media con il valore di -5 mm/y e di 5 mm/y (Figura 7.2.7 e 7.2.8).

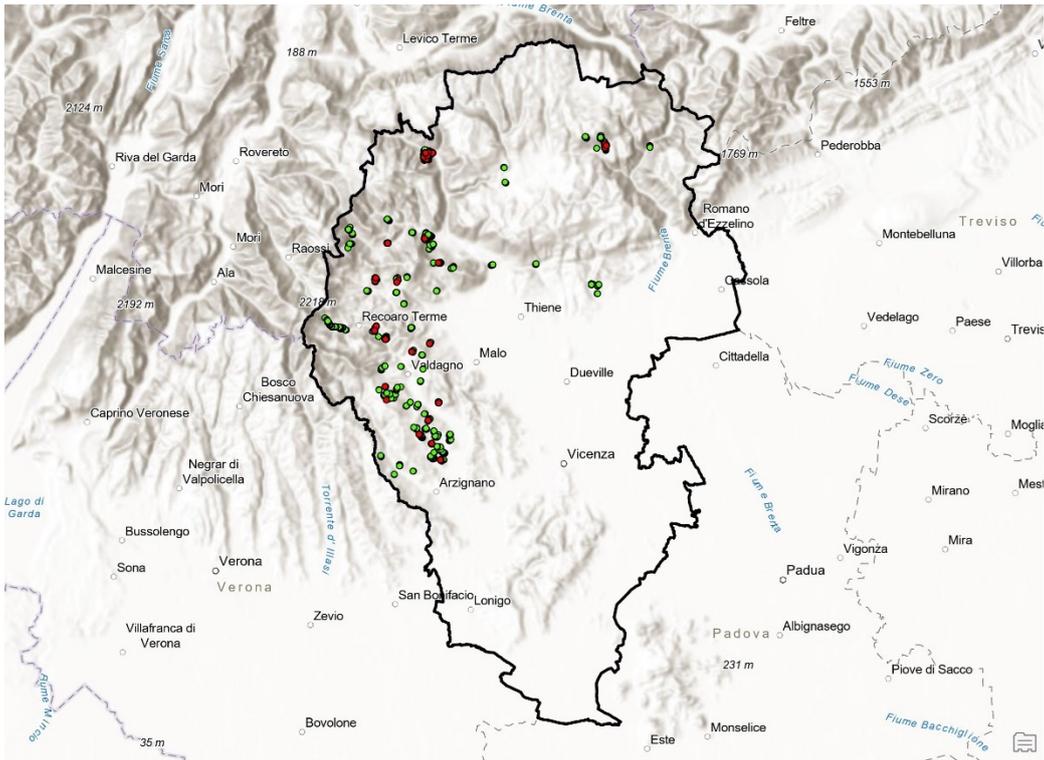


Fig 7.2.7 Punti stabili (verdi) ed instabili (rossi) della Provincia di Vicenza nel periodo 2015-2021

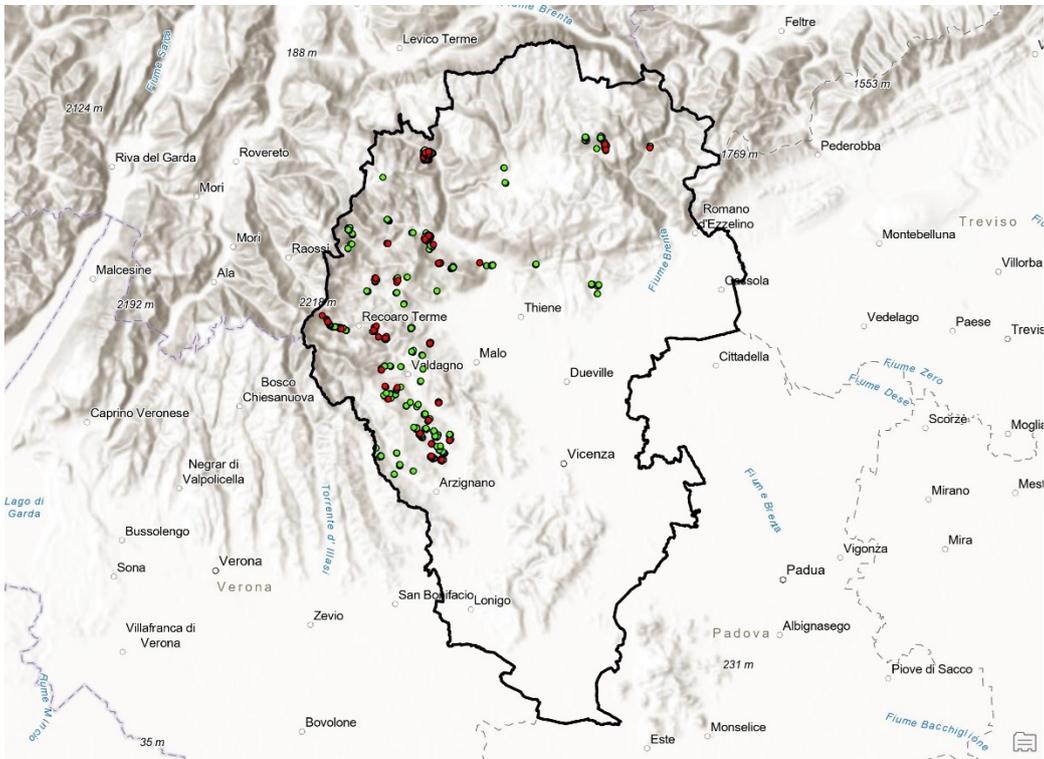


Fig 7.2.8 Punti stabili (verdi) ed instabili (rossi) della Provincia di Vicenza nel periodo 2018-2022

Lo stato di attività mostra una situazione dinamicamente tranquilla, nonostante qualche comparsa di nuovi punti instabili, per esempio, nel comune di Recoaro Terme. Analizzando la mappa si può notare che i punti instabili si trovano in prossimità verso Cima Carega, quindi in zone ad alte altitudine con pendenze ripide, con maggiore probabilità di franosità, come mostrato nella Figura 7.2.9.



Fig 7.2.9 Si registra aumento di punti instabili (rossi) dal periodo 201-2021 (a sx) al periodo 2018-2022 (a dx)

Le statistiche di stabilità ed instabilità per ogni orbita in riferimento all'area totale delle frane stabili ed instabili (Tabella 7.2.9, 7.2.10, 7.2.11 e 7.2.12) vengono riportate di seguito, tenendo conto che l'area di d'interesse della Provincia di Vicenza è pari a 2722.9 km².

Densità media frane stabili in pt/km ²			
2015-2021			
Orbita	Ascendenti	Discendenti	
N°orbita	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Atot frane	7,73	7,60	7,18
Dm	22,69	34,49	15,42
%	6,44	9,63	4,07

Tab. 7.2.9 Densità media delle frane stabili in pt/km² nella Provincia di Vicenza 2015-2021

Densità media frane stabili in pt/km ²			
2018-2022			
Orbita	Ascendenti	Discendenti	
N°orbita	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Atot frane	7,22	7,63	7,49
Dm	27,02	55,41	21,04
%	7,16	15,53	5,79

Tab. 7.2.10 Densità media delle frane stabili in pt/km² nella Provincia di Vicenza 2018-2022

Densità media frane instabili in pt/km ²			
2015-2021			
Orbita	Ascendenti	Discendenti	
N°orbita	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Atot frane	5,76	5,09	6,12
Dm	0,17	1,49	1,30
%	0,03	0,27	0,29

Tab. 7.2.11 Densità media delle frane instabili in pt/km² nella Provincia di Vicenza 2015-2021

Densità media frane instabili in pt/km ²			
2018-2022			
Orbita	Ascendenti	Discendenti	
N°orbita	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Atot frane	5,95	7,23	6,46
Dm	0,50	1,74	1,71
%	0,11	0,46	0,40

Tab. 7.2.12 Densità media delle frane instabili in pt/km² nella Provincia di Vicenza 2018-2022

Le statistiche confermano l'interpretazione basata sulla visualizzazione dello stato di attività, cioè nonostante l'insorgere dei punti attivi che necessitano di maggiore controllo e continuo monitoraggio, predomina la parte inattiva fra il primo periodo ed il secondo.

7.3 Toscana

L'area di studio è molto diversa, in quanto ricopre solo una parte delle tre Provincie, inclusa la città di Pistoia. In effetti è possibile vedere la grande quantità dei punti all'interno di questa città e anche in Borgo San Lorenzo, situato più ad est.

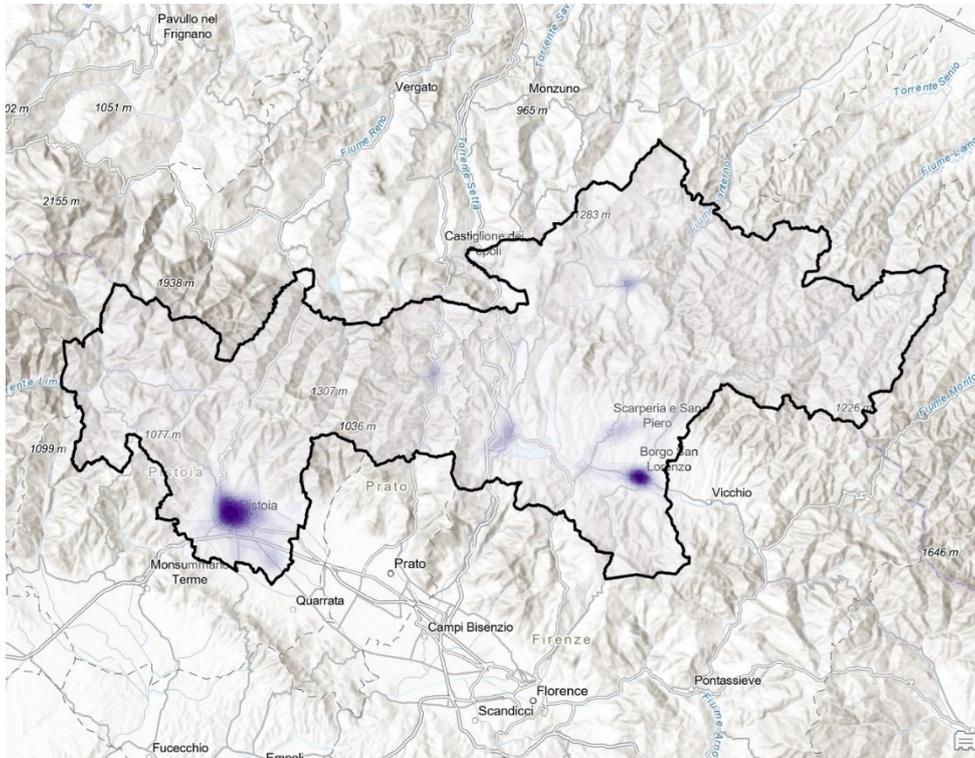


Fig 7.3.1 Mappa della distribuzione spaziale degli MP di un'orbita sull'area di studio nella Regione della Toscana

L'area in esame, come per le Province di Belluno e Vicenza, mostra una maggiore concentrazione dei punti nell'altopiano Pistoiese. Però, per l'analisi dei dissesti non basta affidarsi solo ai punti EGMS.

Le orbite che ricoprono l'area delimitata dal Bacino del Reno, 015 e 095, hanno individuato più punti di misurazione grazie ai loro angoli di vista e con il nuovo aggiornamento, grazie all'evoluzione dei centri abitati, vengono rivelati nuovi PS.

I valori della densità media (Dm) in punti per chilometro quadrato vengono riportati nelle tabelle e calcolati all'interno dell'area della Regione della Toscana (Tabella 7.3.1 e 7.3.2), inclusi gli istogrammi corrispondenti (Figura 7.3.2 e 7.3.4).

Densità media in pt/km ²				
2015-2021				
Orbita	Ascendenti		Discendenti	
N°orbita	Orbita 015	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Dm	228,16	194,33	228	146,39

Tab. 7.3.1 Densità media in pt/km² del periodo 2015-2021

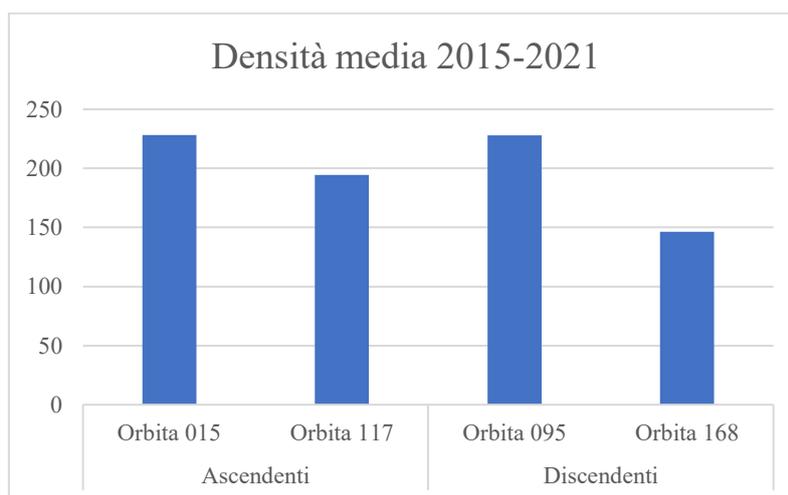


Fig 7.3.2 Istogramma della densità media 2015-2021

Densità media in pt/km ²				
2018-2022				
Orbita	Ascendenti		Discendenti	
N°orbita	Orbita 015	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Dm	257,85	200,88	246,52	174,70

Tab. 7.3.2 Densità media in pt/km² del periodo 2018-2022

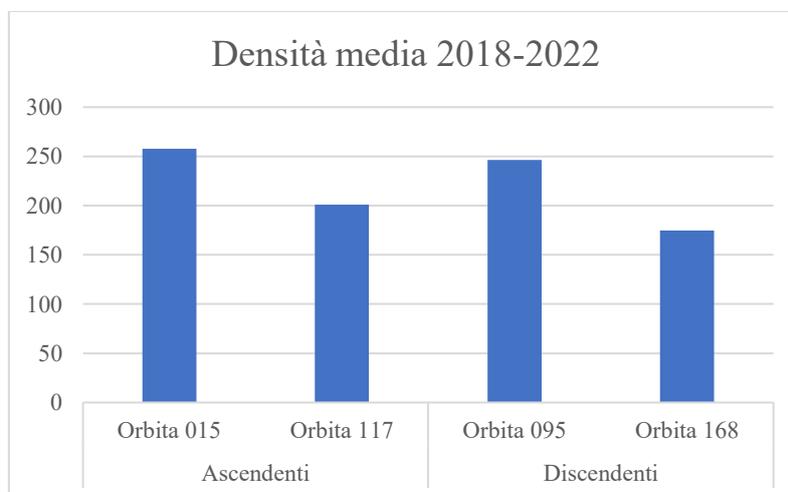


Fig 7.3.3 Istogramma della densità media 2018-2022

Nonostante la presenza di una zona montana predominante in tutta la parte settentrionale, sono stati registrati più punti nelle aree pianeggianti che nelle aree montane, a causa delle caratteristiche del PS. Lo si può dimostrare tramite le tabelle (Tabella 7.3.3 e 7.3.4) e i corrispettivi istogrammi (Figura 7.3.4 e 7.3.5). Specialmente quelle registrate dalle orbite 015 e 095.

Densità media in pianura e montagna in pt/km ²				
2015-2021				
Orbita	Ascendenti		Discendenti	
N°orbita	Orbita 015	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Pianura	387,59	340,62	402,92	267,56
Montagna	66,04	58,81	66,20	37,11

Tab. 7.3.3 Densità media in pt/km² in pianura e montagna del periodo 2015-2021

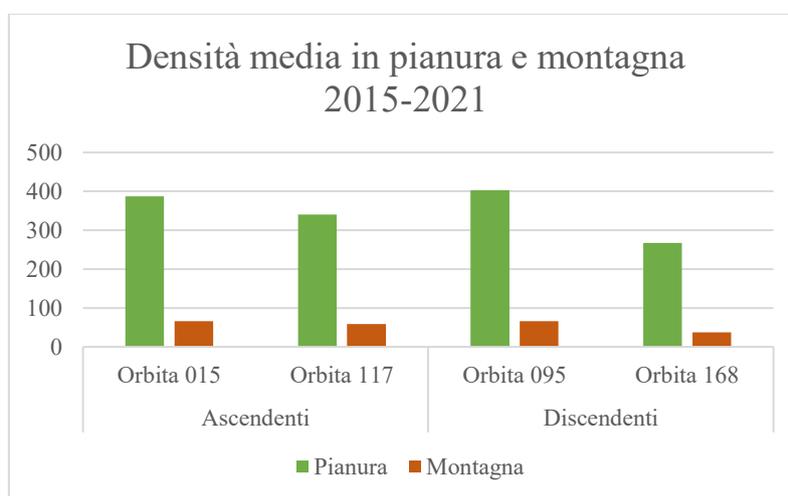


Fig 7.3.4 Istogramma della densità media in pianura e montagna del periodo 2015-2021

Densità media in pianura e montagna in pt/km ²				
2018-2022				
Orbita	Ascendenti		Discendenti	
N°orbita	Orbita 015	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Pianura	431,37	351,89	433,96	317,88
Montagna	81,84	61,66	73,18	45,80

Tab. 7.3.4 Densità media in pt/km² in pianura e montagna del periodo 2018-2022

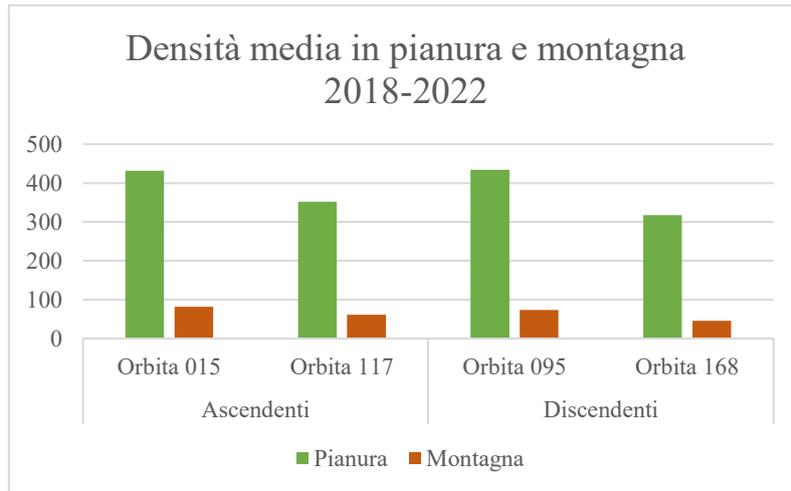


Fig 7.3.5 Istogramma della densità media in pianura e montagna del periodo 2018-2022

Riportando la rappresentazione della densità degli MP, la maggior parte è concentrata nella città di Pistoia e la stessa visuale si ripresenta anche con i valori della coerenza temporale, grazie alla presenza degli elementi artificiali che restituiscono un segnale radar costante nel tempo (Figura 7.3.6).

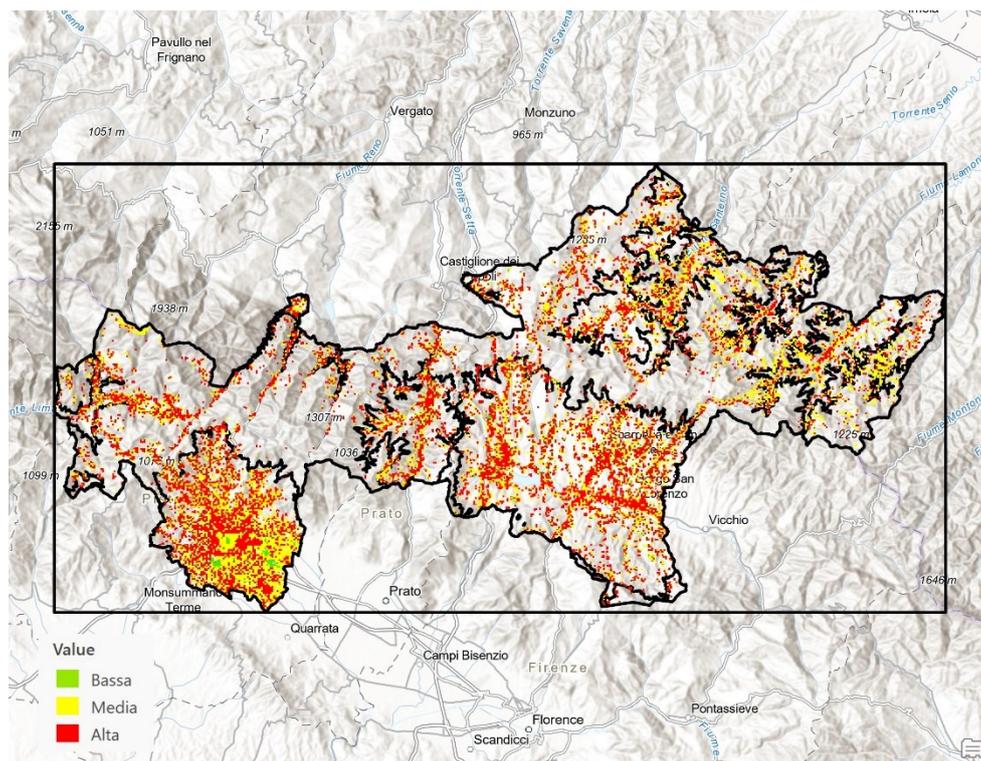


Fig 7.3.6 Diversi MP con qualità differente nell'area delimitata dal Bacino del Reno
(Qualità Bassa < 0.40, Qualità Media < 0.70, Qualità Alta < 0.99)

Le zone pianeggianti mostrano in egual quantità la misura dell'affidabilità dei dati, come dimostrato anche dalle tabelle (Tabella 7.3.5 e 7.3.6). Lungo i territori altomontani i dati della coerenza scarseggiano, lasciando alcune zone isolate, specialmente intorno alla Riserva naturale di Acquerino Cantagallo collocata sopra la città di Prato.

Coerenza temporale				
2015-2021				
Orbita	Ascendenti		Discendenti	
N°orb	Orbita 015	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Bassa	139 (1,67%)	105 (1,02%)	79 (0,80%)	108 (1,13%)
Media	6037 (72,70%)	5899 (57,14%)	5350 (54,14%)	3417 (35,62%)
Alta	4128 (49,74%)	5324 (51,55%)	6449 (65,30%)	6073 (63,25%)

Tab. 7.3.5 N° di punti appartenenti alle diverse classi di qualità del periodo 2015-2021
(Qualità Bassa < 0.40, Qualità Media < 0.70, Qualità Alta < 0.99)

Coerenza temporale				
2018-2022				
Orbita	Ascendenti		Discendenti	
N°orbita	Orbita 015	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Bassa	183 (1,89%)	75 (0,77%)	65 (0,57%)	73 (0,70%)
Media	5794 (59,93%)	6937 (71,34%)	5385 (47,23%)	4732 (45,47%)
Alta	4694 (48,53%)	5708 (58,72%)	7055 (61,87%)	5608 (53,83%)

Tab. 7.3.6 N° di punti appartenenti alle diverse classi di qualità del periodo 2018-2022
(Qualità Bassa < 0.40, Qualità Media < 0.70, Qualità Alta < 0.99)

Il campo di studio all'interno della Regione della Toscana è un po' più complesso da interpretare, perché non si basa su un limite amministrativo come per le Province di Belluno e Vicenza, ma su un'area individuata dalla delimitazione del Bacino del Reno. Quindi, i valori in confronto potrebbero risultare sproporzionati (Tabella 7.3.7 e 7.3.8). Vengono riportati la somma complessiva dei punti (*Sum Counts*) ed il totale aggregato delle aree di frana (*Sum Area*) per determinare la densità complessiva (*D complex*) espressa in punti per metro quadro.

Densità nelle frane a partire da almeno 1 punto nei poligoni				
2015-2021				
Orbita	Ascendenti		Discendenti	
N°orbita	Orbita 015	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Sum Counts	23690	24500	27916	15236
Sum Area	72372171,95	77395310,92	84371544,09	71392760,77
D complex (punti/m ²)	0,00032	0,00031	0,00033	0,00021
Densità (punti/ettaro)	3,27	3,16	3,30	2,13

Tab. 7.3.7 Densità complessiva delle frane all'interno della Toscana in relazione al periodo 2015-2021

Calcolo densità nelle frane a partire da almeno 1 punto nei poligoni				
2018-2022				
Orbita	Ascendenti		Discendenti	
N°orbita	Orbita 015	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Sum Counts	29142	24492	30122	18575
Sum Area	72563344,92	82572198,86	88526099,25	81438376,34
D complex (punti/m ²)	0,00040	0,00029	0,00034	0,00022
Densità (punti/ettaro)	4,01	2,96	3,40	2,28

Tab. 7.3.8 Densità complessiva delle frane all'interno della Toscana in relazione al periodo 2018-2022

In particolare, l'orbita 117 nel secondo periodo ha avuto un calo nella densità media, perché viene registrato un aumento dell'area complessiva delle frane, mentre il numero totale dei punti rimane quasi invariato. Nella 015, ad esempio, l'area è rimasta invariata. Tuttavia, l'aumento del conteggio degli MP ha influenzato l'esito finale, proprio com'è stato con la 168 a parti invertite, cioè quantità quasi uguale dei punti di misurazione, ma con un ingrandimento dell'area.

Selezionati i punti dei poligoni che contengono da 5 punti in su, viene fatta la suddivisione in due classi fra attivi ed instabili in base alla velocità media con i valori di -5 mm/y e di 5 mm/y (Figura 7.3.7 e 7.3.8) in modo da avere una visualizzazione dello stato di attività dei punti di misurazione.

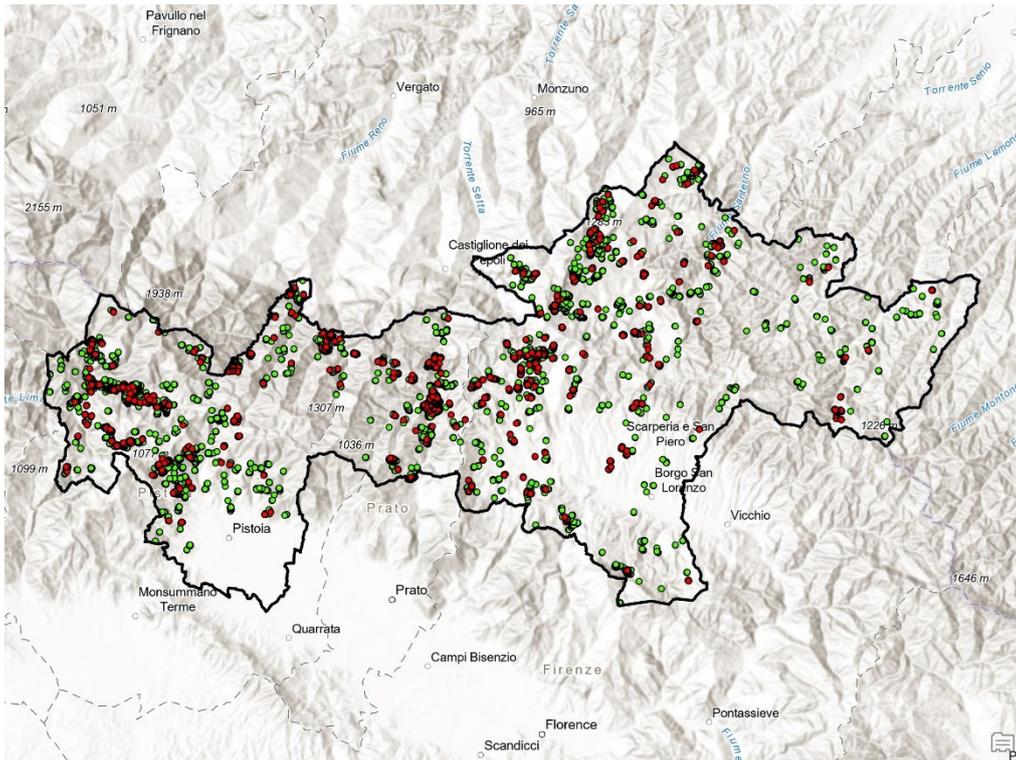


Fig 7.3.7 Punti stabili (verdi) ed instabili (rossi) dell'area di studio nella Regione della Toscana nel periodo 2015-2021

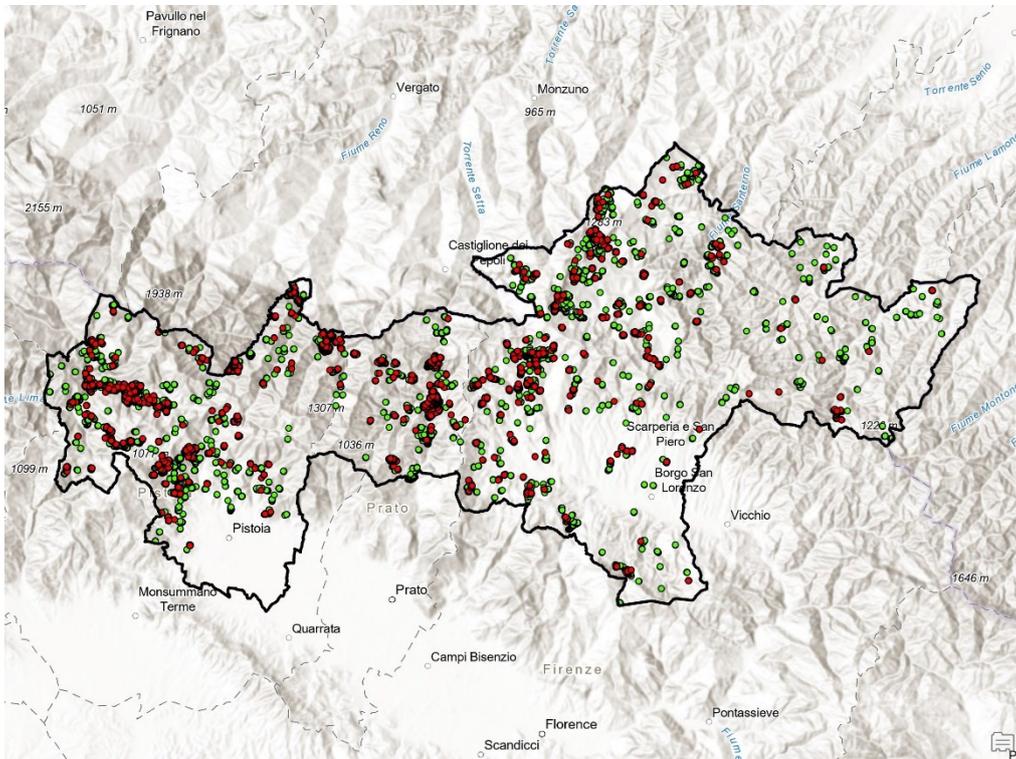


Fig 7.3.8 Punti stabili (verdi) ed instabili (rossi) dell'area di studio nella Regione della Toscana nel periodo 2018-2022

In questo caso, l'analisi visiva risulta più difficoltosa perché le frane, nonostante occupino una piccola parte della delimitazione del Bacino del Reno, presentano un'intensa concentrazione dei punti di misurazione all'interno di esse. Per questo motivo bisognerebbe entrare in dettaglio esaminando poligono per poligono (Figura 7.3.9).

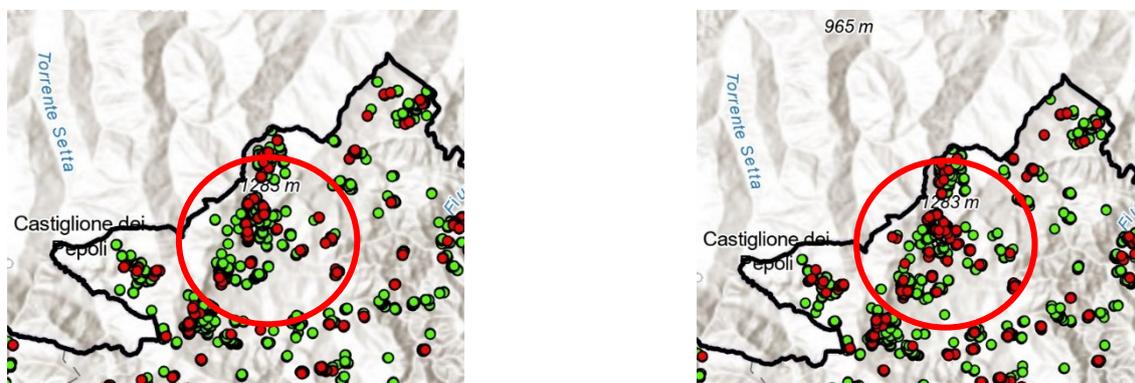


Fig 7.3.9 Confronto dello stato di attività del periodo 2015-2021 (a sx) e del 2018-2022 (a dx) nell'area delimitata dal Bacino del Reno

Ad esempio, nel cerchio rosso si possono notare alcune cose interessanti che nelle Province analizzate in precedenza non sono state messe in grande risalto. Si può osservare la comparsa dei punti attivi fra il primo ed il secondo periodo, ma anche la scomparsa degli stessi. Un motivo potrebbe essere legato al fatto che la zona franosa si sia stabilizzata con il tempo e che non sia più considerata critica. Va osservato che si tratta di due periodi diversi per tutta la durata del monitoraggio.

Per un approfondimento vengono eseguite delle statistiche di stabilità ed instabilità per ogni orbita (Tabella 7.3.9, 7.3.10, 7.3.11 e 7.3.12) e riportate di seguito, tenendo conto che l'area di d'interesse all'interno della Regione della Toscana è pari a 1538.1 km². Va notato che le tabelle riportano l'area totale delle frane stabili ed instabili.

Densità media frane stabili in pt/km ²				
2015-2021				
Orbita	Ascendenti		Discendenti	
N°orbita	Orbita 015	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Atot frane	61858	65612	68202	56540
Dm	61,13	53,57	60,47	34,46
%	245,86	228,52	268,13	126,69

Tab. 7.3.9 Densità media delle frane stabili in pt/km² nell'area delimitata dal Bacino del Reno 2015-2021

Densità media frane stabili in pt/km ²				
2018-2022				
Orbita	Ascendenti		Discendenti	
N°orbita	Orbita 015	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Atot frane	62190	65606	73672	63426
Dm	77,43	52,52	62,75	38,02
%	313,11	224,03	300,56	156,82

Tab. 7.3.10 Densità media delle frane stabili in pt/km² nell'area delimitata dal Bacino del Reno 2018-2022

Il valore della percentuale è elevato perché le frane coprono solo una piccola porzione dell'area totale di analisi (tot area totale delle frane su 1538,1 km²), ma hanno una densità media molto alta.

Densità media frane instabili in pt/km ²				
2015-2021				
Orbita	Ascendenti		Discendenti	
N°orbita	Orbita 015	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Atot frane	59515	63561	66201	51302
Dm	4,87	4	3,30	2,11
%	18,86	16,55	14,21	7,06

Tab. 7.3.11 Densità media delle frane instabili in pt/km² nell'area delimitata dal Bacino del Reno a 2015-2021

Densità media frane instabili in pt/km ²				
2018-2022				
Orbita	Ascendenti		Discendenti	
N°orbita	Orbita 015	Orbita 117	Orbita 095	Orbita 168
Atot frane	60682	61455	72516	57055
Dm	7,63	5,31	3,47	3,16
%	30,13	21,21	16,36	11,73

Tab. 7.3.12 Densità media delle frane instabili in pt/km² nell'area delimitata dal Bacino del Reno 2018-2022

Per confermare la teoria e continuare con l'interpretazione dei dati interferometrici insieme alle frane è necessario integrare le analisi effettuate con i dati geomorfologici e topografici, per visualizzare i cambiamenti avvenuti nel corso del tempo nell'area di studio. Un altro passo potrebbe essere lo studio dai cataloghi delle frane verificatesi in passato, analizzare i dati geotecnici, integrare le condizioni climatiche e pluviometriche oppure effettuare dei sopralluoghi per avere un quadro più accurato.

Conclusioni

Lo studio ha dimostrato l'utilità del Servizio Europeo di Monitoraggio del Movimento del Suolo (EGMS) per analizzare i fenomeni di deformazione della superficie terrestre in diverse aree del territorio italiano. Attraverso il supporto dei dati satellitari Sentinel-1 e l'interferometria differenziale SAR è stato possibile ottenere una visione delle dinamiche del suolo con una precisione millimetrica.

Le analisi condotte sulle Province di Belluno, Vicenza e sull'area settentrionale dell'area delimitata dal bacino del Reno che presentano caratteristiche geologiche, litologiche e territoriali differenti hanno dato esiti interessanti. Dalle mappe ottenute sulla rappresentazione della distribuzione dei punti EGMS, emerge una grande concentrazione localizzata all'interno delle zone di pianura e delle città dove sono presenti molti riflettori radar. Per esempio, nella Provincia di Vicenza, dove predomina l'ambiente di pianura, è presente una localizzazione ampia e ricca di punti di misurazione, mentre Belluno e l'area di studio nella Toscana si concentrano maggiormente nelle città principali. Anche la mappa della distribuzione degli MP in base alla coerenza segue lo stesso principio di prima: l'affidabilità dei punti dipende dalla loro posizione e dagli altri punti circostanti. Infatti nelle zone montuose di Belluno e Vicenza non sono presenti molti dati con una coerenza alta come quella media, compresa tra 0.4 e 0.7, mentre nella Toscana si presentano in quasi eguali quantità.

Uno degli aspetti principali emersi è l'importanza dell'integrazione dei dati EGMS con altre fonti, come i poligoni delle frane ricavate dall'IFFI per migliorare l'interpretazione dei fenomeni di instabilità. Sebbene i dati EGMS forniscano un quadro affidabile, la loro densità e qualità possono risultare limitate in zone particolarmente impervie o a copertura vegetale densa, evidenziando la necessità di integrare con rilievi sul campo ed altre risorse geospaziali. Prendendo in considerazione la mappa della coerenza temporale viene confermata la tesi, in quanto è caratterizzata maggiormente da punti con affidabilità media. All'interno di alcuni poligoni, però, sono contenuti sia i punti stabili che quelli instabili e quindi è difficile dimostrare quale sia la vera realtà e stabilire definitivamente il suo stato di attività.

Le statistiche ottenute indicano che la maggior parte dei punti monitorati risultano stabili, ma l'identificazione di aree critiche con velocità di movimento significative conferma l'utilità del servizio per l'individuazione precoce di situazioni di rischio.

Questo rappresenta uno dei vantaggi per la pianificazione territoriale e la prevenzione dei rischi geologici.

In Toscana, per esempio, le statistiche delle frane stabili risultano molto elevate, perché le frane coprono una quantità minima dell'area totale, ma con una densità molto concentrata all'interno di esse.

In conclusione, il lavoro svolto evidenzia come il servizio rappresenti uno strumento indispensabile per il monitoraggio delle deformazioni del terreno, se integrato insieme agli altri file geografici da altre fonti. Tuttavia, si consiglia di proseguire con ulteriori studi per migliorare la copertura spaziale e temporale dei dati e per sviluppare modelli predittivi più accurati, in grado di affrontare i fenomeni naturali.

Bibliografia

Adam, N. (2019). *Methodology of a Troposphere Effect Mitigation Processor for SAR Interferometry*. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 12(12), 5334-5344.

Adam, N., Kampes, B. and Eineder, M. (2005). *Development of a scientific permanent scatterer system: Modifications for mixed ERS/ENVISAT time series*. In Envisat & ERS Symposium (Vol. 572).

Alonso, M.S. and Aróstegui, J.L., G. (2014). *Sobreexplotación de acuíferos en la cuenca del Segura*. ISBN: 978-84-92988-22-8.

Analisi di dati radar satellitari mediante la tecnologia PSInSAR, Manuale d'uso. T.r.e., Sensing the Planet. (2009).

Ansari, H., De Zan, F. and Parizzi, A. (2021). *Study of Systematic Bias in Measuring Surface Deformation with SAR Interferometry*. in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 59, no. 2, pp. 1285-1301, Feb. 2021.

Aslan, G., Foumelis, M., Raucoules, D., De Michele, M., Bernardie, S. and Cakir, Z. (2020). *Landslide Mapping and Monitoring Using Persistent Scatterer Interferometry (PSI) Technique in the French Alps*. Remote Sensing, 12(8).

Bamler, R. and Hartl P. (1998). *Synthetic Aperture Radar Interferometry*. Inverse Problems, 14, R1-R54.

Bamler, R., and Eineder, M. (2005). *Accuracy of differential shift estimation by correlation and split-bandwidth interferometry for wideband and delta-k SAR systems*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2(2), 151-155.

Beccaro, L., Tolomei, C., Gianardi, R., Sepe, V., Bisson, M., Colini, L., De Ritis, R. and Spinetti, C. (2021). *Multitemporal and Multisensor InSAR Analysis for Ground Displacement Field Assessment at Ischia Volcanic Island (Italy)*. Remote Sens. 2021, 13.

Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. and Sansosti, E. (2002). *A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms*. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 40(11), pp.2375-2383.

Bignami, C., Albano, M., Guglielmino, F., Tolomei, C., Atzori, S., Trasatti, E., Polcari, M., Puglisi, G., Stramondo, S. and Salvi, S. (2019). *InSAR imaging of the December 2018 Etna Eruption*. EGU General Assembly 2019. Geophysical Research Abstracts, 21.

Blasco, J.M.D., Fomelis, M., Stewart, C. and Hooper, A. (2019). *Measuring Urban Subsidence in the Rome Metropolitan Area (Italy) with Sentinel-1 SNAP-StaMPS Persistent Scatterer Interferometry*. Remote Sensing, 11(2).

Boni, R., Herrera, G., Meisina, C., Notti, D., Béjar-Pizarro, M., Zucca, F. and Mora, O. (2015). *Twenty-year advanced DInSAR analysis of severe land subsidence: The Alto Guadalentín Basin (Spain) case study*. Engineering Geology, 198.

Bozzano, F., Esposito, C., Mazzanti, P., Patti, M. and Scancella, S. (2018). *Imaging Multi-Age Construction Settlement Behaviour by Advanced SAR Interferometry*. Remote Sensing, 10(7).

Capes, R. and Passera, E. (2023). *Product Description and Format Specification (Version 2.0)*. End-to-end implementation and operation of the European Ground Motion Service (EGMS).

Casu, F., Bonano, M., Castaldo, R., De Luca, C., De Novellis, V., Lanari, R., Manunta, M., Manzo, M., Onorato, G., Pepe, S., Solaro, G., Tizzani, P., Valerio, E. and Zinno, I. (2019). *Monitoring Volcano Deformation from Space with Sentinel-1 Data for Civil*

Protection. IGARSS 2019 – 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.

CEOS SAR Calibration Workshop, ESTEC, Noordwijk, Netherlands, September 1993.

Chen, C.W. and Zebker, H.A. (2001). *Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization*. JOSA A, 18(2), pp.338-351.

Colesanti, C., Ferretti, A., Novali, F., Prati, C. and Rocca, F. (2003). *SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41(7), 1685-1701.

Cooksley, G. et al. (2004). *S5: Service Portfolio Specifications*. ESA-Terrafirma project dossier.

Costantini, M. (1998). *A novel phase unwrapping method based on network programming*. Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36(3), 813-821.

Costantini, M., Falco, S., Malvarosa, F., Minati, F. and Trillo F. (2009). *Method of persistent scatterer pairs (PSP) and high-resolution SAR interferometry*. Proc. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Cape Town, South Africa, III, 904-907.

Crosetto, M. and Cuevas, M. (2024). *Guidelines for EGMS product analysis (Version 1.1)*. EGMS Advisory Board.

Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthery, N. and Crippa, B. (2016). *Persistent scatterer interferometry: A review*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 115, pp.78-89.

Crosetto, M., Monserrat, O., Iglesias, R., and Crippa, B. (2010). *Persistent scatterer interferometry*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 76(9), 1061-1069.

Cumming, I.G. and Wong, F.H. (2005). *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*. Artech House Remote Sensing Library. ISBN 1-58053-058-3.

Curlander, J.C., and McDonough, R.N. (1991). *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing Wiley Series in Remote Sensing and Image Processing*. ISBN 0-471-85770-X.

Davis, B. (2020). *Precision and accuracy in glacial geology*. AntarcticGlaciers.org. Retrieved 29 March 2021.

De Novellis, V., Atzori, S., De Luca, C., Manzo, M., Valerio, E., Bonano, M., Cardaci, C., Castaldo, R., Di Bucci, D., Manunta, M., Onorato, G., Pepe, S., Solaro, G., Tizzani, P., Zinno, I., Neri, M., Lanari, R. and Casu, F. (2019). *DInSAR analysis and analytical modelling of Mount Etna displacements: The December 2018 volcano-tectonic crisis*. *Geophysical Research Letters*, 46.

De Zan, F. (2011). *Coherent Shift Estimation for Stacks of SAR Images*. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 8, no. 6, pp. 1095–1099, Nov 2011.

Del Ventisetti, C., Solari, L., Raspini, F., Ciampalini, A., Di Traglia, F., Moscatelli, M., Pagliaroli, A. and Moretti, S. (2015). *Use of PSInSAR data to map highly compressible soil layers*. *Geologica Acta*, 13(4).

Dzurisin, D. (2006). *Volcano Deformation*. Springer. ISBN 3-540- 42642-6.

Eineder, M., Minet, C., Steigenberger, P., Cong, X., and Fritz, T. (2010). *Imaging geodesy—Toward centimetre-level ranging accuracy with TerraSAR-X*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(2), 661-671.

ESA Manual, 2007.

Even, M., Schunert, A., Schulz, K. and Soergel, U. (2010). *Atmospheric phase screen-estimation for PSInSAR applied to TerraSAR-X high resolution spotlight-data*. Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, USA.

Fabiano, G. da Silva, Ramos, L. P., Palm, B. G. and Machado, R. (2022). *Assessment of Machine Learning Techniques for Oil Rig Classification in C-Band SAR Images*. Remote Sensing, 14, 2966.

Fattahi, H., Agram, P., and Simons, M. (2017). *A Network-Based Enhanced Spectral Diversity Approach for TOPS Time series Analysis*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 55, no. 2, pp.777–786, Feb 2017.

Ferretti, A. (2014). *Satellite InSAR Data: Reservoir Monitoring from Space* (1a ed). Eage Publications bv.

Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F. and Rucci, A. (2011). *A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR*. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 49(9), pp.3460-3470.

Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C. and Rocca, F., Massonet, D. (2007). *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*. Pubblicazioni ESA, TM-19.

Ferretti, A., Novali, F., Passera, E., Prati, C. and Rocca F. (2005). *Statistical analysis of atmospheric components in ERS SAR data*. Proc. FRINGE 2005.

Ferretti, A., Passera, E. and Capes, R. (2023). *Algorithm Theoretical Basis Document* (Version 3.0). End-to-end implementation and operation of the European Ground Motion Service (EGMS).

Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F. (2000). *Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38(5), 2202-2212.

Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F. (2001). *Permanent Scatterers in SAR Interferometry*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(1), 8 -20.

Fuhrmann, T. (2016). *Surface Displacement from Fusion of Geodetic Measurement Techniques applied to the Upper Rhine Graben*. DGK - Deutsche Geodätische Kommission der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.

Ghiglia, D.C. and Pritt, M.D. (1998). *Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software*. John Wiley and Sons. ISBN 0-471-24935-1.

Hanssen, R.F. (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Kluwer Academic Publishers. ISBN 0-7923-6945-9.

Hooper, A. (2008). *A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches*. Geophysical Research Letters, 35, p. L16 302.

Hooper, A., Zebker, H., Segall, P. and Kampes, B. (2004). *A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers*. Geophysical Research Letters, 31, L23611.

Iglesias, R. and Mallorqui, J. J. (2013). *Side-lobe cancelation in DInSAR pixel selection with SVA*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 10, no. 4, pp. 667–671.

Jover, R. T. (2016). *The Valley of Guadalentín in Lorca, the deepest in Europe according to research in collaboration with the University of Alicante*. (U. o. Alicante, Editor) Accessed at 11.02.2022.

Kampes, B.M. (2006). *Radar Interferometry – Persistent Scatterer Technique*. Springer. ISBN-10 1-4020-4576-X (HB).

Kotzerke, P., Siegmund, R. and Langenwalter, J. (2022). *Product User Manual* (Version 1.6). End-to-end implementation and operation of the European Ground Motion Service (EGMS).

Larsen, Y., Marinkovic, P., Dehls, J. and Stødle, D. (2023). *End User Interface Manual* (Version 3.0). End-to-end implementation and operation of the European Ground Motion Service (EGMS).

Larsen, Y., Marinkovic, P., Dehls, J. F., Bredal, M., Bishop, C., Jøkulsson, G., Gjøvik L.-P., Frauenfelder, R., Salazar, S. E., Vöge, M., Costantini, M., Minati, F., Trillo, F., Ferretti, A., Capes, R., Bianchi, M., Parizzi, A., Brcic, R., Casu, F., Lanari, R., Manunta, M., Manzo, M., Bonano, M., De Luca, C., Onorato, G., Zinno, I. and Andersen, H. S. (2020). *European Ground Motion Service: Service Implementation Plan and Product Specification Document* (Version 1.01). European Environment Agency.

Lima, P., Steger, S. and Glade, T. (2021). *Counteracting flawed landslide data in statistically based landslide susceptibility modelling for very large areas: a national-scale assessment for Austria*. *Landslides*, 18.

Macchiarulo, V. (2022). *Integration of satellite radar interferometry and civil engineering produceres to assess building and infrastructure conditions*. [Doctoral dissertation, University of Bath].

Monti Guarnieri, A. (2003). *Using Topography Statistics to Help Phase Unwrapping*. *IEE Proceedings of Radar, Sonar and Navigation*, 150(3), 144-151.

Perissin, D. and Ferretti, A. (2007). *Urban-Target Recognition by Means of Repeated Spaceborne SAR Images*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(12), pp. 4043-4058.

Perissin, D., and Rocca, F. (2006). *High-accuracy urban DEM using permanent scatterers*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44(11), 3338-3347.

Prats-Iraola, P., Scheiber, R., Marotti, L. et al. *TOPS Interferometry with TerraSAR-X*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 50, no. 8, pp. 3179–3188, Aug 2012.

Raucoules D., Bourguine B., de Michele M., Le Cozanet G., Closset L., Bremmer C., Veldkamp, H., Tragheim D., Bateson L., Crosetto M. and Agudo M., (2007).

Persistent Scatterers Interferometry Independent Validation and Intercomparison of Results. Final Report, BRGM/RP-55649-FR.

Rosen, P., Hensley S., Joughin I., Li F., Madsen S.N., Rodriguez E. and Goldstein R. (2000). *Synthetic Aperture Radar Interferometry*. Proceedings of the IEEE, 88(3), 333-382.

Scheiber, R. and Moreira, A. (2000). *Coregistration of interferometric SAR images using spectral diversity*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 38, no. 5, pp. 2179–2191, Sep 2000.

Small, D. and Schubert A., (2019), *Guide to Sentinel-1 Geocoding*. University of Zurich.
Sørensen, C. S., Broge, N. H., Mølgaard, M. R., F. Levinsen, J., Okkels, N. and Knudsen, P. (2016). *Advancing Coastal Climate Adaptation in Denmark by Land Subsidence Mapping using Sentinel-1 Satellite Imagery*. Geoforum Perspektiv, 15(28).

Wackernagel, H. (2003). *Multivariate Geostatistics, An Introduction with Applications* (3rd edition), Springer-Verlag. ISBN 3-540-44142-5.

Werner, C., Wegmuller, U., Strozzi, T. and Wiesmann, A. (2003). *Interferometric point target analysis for deformation mapping*. Proc. IEEE International Geoscience and

Remote Sensing Symposium, Toulouse, France Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti, "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential interferograms," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 40, No. 11, pp. 2375–2383, 2002.

Zimmerman, D., Pavlik, C., Ruggles, A., and Armstrong, M. P. (1999). *An experimental comparison of ordinary and universal kriging and inverse distance weighting*. *Mathematical Geology*, 31(4), 375-390.

Sitografia

<https://land.copernicus.eu/pan-european/european-ground-motion-service>

<http://earth.esa.int/fringe2005/>

http://earth.esa.int/psic4/PSIC4_D9_final_report.pdf

http://geologiavda.partout.it/GeologiaVDA/static/documents/PSInSAR_manuale_uso.pdf

<http://www.antarcticglaciers.org/glacial-geology/dating-glacial-sediments-2/precision-and-accuracy-glacial-geology/>

http://www.esa.int/About_Us/ESA_Publications

http://www.esa.int/esapub/tm/tm19/TM-19_ptA.pdf

<https://asf.alaska.edu/uncategorized/what-is-sar/#training>

<https://beta.idrogeo.isprambiente.it/app/iffi?@=41.55172525858242,12.573501484000001,1>

<https://docs.disasterscharter.org/missions/sar/sentinel-1/>

<https://egms.land.copernicus.eu/>

https://esamultimedia.esa.int/multimedia/publications/TM-19/TM-19_InSAR_web.pdf

<https://researchportal.bath.ac.uk/en/studentTheses/integration-of-satellite-radar-interferometry-and-civil-engineeri>

<https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s1-mission>

<https://web.ua.es/en/actualidad-universitaria/2016/julio16/18-24/the-valley-of-guadalentin-in-lorca-the-deepest-in-europe-according-to-research-in-collaboration-with-the-university-of-alicante.html>.

<https://www.brgm.fr/en/news/press-kit/lorraine-coal-basin-management-water-municipality-freyming-merlebach>

<https://www.earthdata.nasa.gov/learn/earth-observation-data-basics/sar>

<https://www.earthdoc.org/content/books/9789462820036>

https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/img_up/pal_polarization.htm

https://www.researchgate.net/publication/361507626_Assessment_of_Machine_Learning_Techniques_for_Oil_Rig_Classification_in_C-Band_SAR_Images

<https://www.slideshare.net/LucaMarescotti/06-mc-sismologiaws2015#68>

Ringraziamenti

Ringrazio il Professore Filippo Catani per avermi offerto l'opportunità di svolgere la tesi insieme ed avermi dato la possibilità di applicarmi specialmente nell'ambito tecnico. Ringrazio anche il Professore Mario Floris e il Ricercatore Ascanio Rosi per il loro prezioso intervento sul progetto. Ringrazio anche Rebecca Todde per la sua compagnia e per aver reso il lavoro più piacevole, passo dopo passo.

Ringrazio il mio padrino Emilio per il suo intervento paterno nei miei momenti di sconforto. Hai fatto metà del tuo dovere.

Ringrazio gli amici dei miei genitori che nutrono un profondo e puro affetto nei miei confronti. Siete come una seconda famiglia per me.

Ringrazio gli amici ed i parenti per la loro dolce presenza. Specialmente mia nonna Antonietta. Lei, nonostante tutto, è ancora qui con me.

Ringrazio Antonino, il mio ragazzo. Senza di te, sarebbe stato molto più difficile andare avanti. Sei la scelta migliore che abbia mai fatto.

Ringrazio i miei genitori che con i loro sacrifici mi hanno reso la persona che sono. Mamma, ti ho promesso che avrei dedicato la tesi a te e così è stato. Papà, sono contenta che tu sia riuscito a vedermi realizzare fino alla fine. Vi amo.

Questa è la mia più grande rivincita.