



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

**ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI
BOLOGNA**

**DIPARTIMENTO DI SCIENZE BIOLOGICHE, GEOLOGICHE
E AMBIENTALI**

**Corso di Laurea Magistrale in Geologia e Territorio
Curriculum B: Statigrafia Integrata per le Georisorse**

**STUDIO MULTITEMPORALE
DELL'EVOLUZIONE
DEI CAMPI FLEGREI TRAMITE
L'UTILIZZO DEL TELERILEVAMENTO**

Candidato:
Francesco Carati

Relatore:
Prof. Duccio Rocchini

**Sessione Dicembre 2025
Anno Accademico 2024/2025**

Indice

Abstract	ii
1 Introduzione	1
1.1 Inquadramento Geografico	1
1.2 Inquadramento Geologico e storia eruttiva	2
1.3 Obiettivi del lavoro	3
2 Metodi	4
2.1 Acquisizione dei dati e tecnologia InSAR	4
2.2 Estrazione dei dati EGMS tramite QGIS	6
2.3 Analisi dei dati tramite RStudio e metodo multitemporale	7
2.3.1 Caricamento dei pacchetti e preparazione dell'ambiente	7
2.3.2 Importazione e trasformazione dei dati	8
2.3.3 Visualizzazione dei transetti	9
2.3.4 Analisi multitemporale con ridge plots	11
2.3.5 Raffinamento dei grafici	13
3 Risultati	16
3.1 Osservazione dei grafici	16
3.1.1 Transetto N-S	16
3.1.2 Transetto W-E	18
4 Discussione	21
4.1 Transetto Nord-Sud: coerenza con il modello atteso	21
4.2 Transetto Ovest-Est: incongruenze rispetto al quadro atteso	21
4.3 Interpretazione delle discrepanze	22
4.4 Analisi integrativa: area di Bologna	23
4.5 Sintesi critica	25
5 Conclusioni	26
6 Codice RStudio	27

Abstract

In questo studio è stata condotta un'analisi multitemporale delle deformazioni del suolo nell'area vulcanica dei Campi Flegrei utilizzando dati satellitari Sentinel-1 già elaborati dal servizio European Ground Motion Service (EGMS). In particolare, sono stati impiegati i dati Ortho, ottenuti dalla combinazione delle acquisizioni ascendenti e discendenti, i quali forniscono una stima della componente verticale del movimento del suolo. I dati sono stati successivamente gestiti e preparati in ambiente GIS mediante QGIS e analizzati in RStudio, applicando il metodo di *Multitemporal Analysis of RS Data* con il pacchetto **ggridges**, che consente di visualizzare e quantificare le variazioni temporali delle deformazioni del terreno. L'approccio ha permesso di evidenziare fenomeni di sollevamento e subsidenza, fornendo indicazioni sui processi vulcanici in atto. I risultati rappresentano un contributo per il monitoraggio geodetico dei Campi Flegrei e per la valutazione del rischio vulcanico nella regione.

Capitolo 1

Introduzione

In questo capitolo viene introdotto il contesto generale del lavoro di tesi, le motivazioni e gli obiettivi della ricerca.

1.1 Inquadramento Geografico

L'area dei Campi Flegrei si colloca nella parte centro-meridionale della penisola italiana, nella regione Campania, a nord-ovest della città di Napoli (Figura 1.1). Si tratta di un esteso sistema vulcanico di circa 130 km², costituito da una caldera formatasi nel corso di una lunga storia vulcanica cominciata in un periodo compreso tra 80 - 60.000 anni fa. Il territorio dei Campi Flegrei comprende sia zone costiere che aree collinari interne, interessando numerosi comuni e località storiche.

Geomorfologicamente, l'area è caratterizzata da un paesaggio estremamente variegato, in cui emergono laghi di origine vulcanica, come il Lago d'Averno e il Lago di Fusaro, crateri, fumarole e solfatare. Queste caratteristiche testimoniano l'intensa attività vulcanica passata e il persistere di processi geotermici ancora attivi. La presenza dell'attuale sismicità locale e le deformazioni del suolo riflettono i processi che continuano ad avvenire nella sottostante camera magmatica, rendendo la zona un laboratorio naturale per lo studio dei fenomeni vulcanici e tettonici.

Il clima dell'area è tipicamente mediterraneo, con estati calde e secche e inverni miti e umidi. Queste condizioni hanno storicamente influenzato l'occupazione umana e le attività agricole, ma il fattore più rilevante oggi è la complessa gestione del rischio vulcanico. La vicinanza di aree densamente abitate, in particolare Napoli e la sua zona metropolitana, aumenta la vulnerabilità della popolazione agli eventi vulcanici. Attualmente si stima che circa 500.000 persone abitino la zona rossa (quella a maggiore rischio) e circa 840.000 siano situate nell'area flegrea. Per questo motivo, i Campi Flegrei sono costantemente monitorati tramite reti sismiche, geodetiche e geochemiche, al fine di rilevare deformazioni del suolo, variazioni dei gas e segnali precursori di eventuali eruzioni con metodi sempre più raffinati (**Tan et al., 2025**) [9]. L'area rappresenta così un contesto di grande



Figura 1.1: Immagine satellitare dei Campi Flegrei, situati a nord-ovest di Napoli. **Fonte:** Google Earth (2025) [6].

interesse scientifico, in cui la comprensione dei processi vulcanici e la prevenzione dei rischi assumono un ruolo cruciale per la sicurezza della popolazione e la pianificazione territoriale.

1.2 Inquadramento Geologico e storia eruttiva

Dal punto di vista geologico, i Campi Flegrei rappresentano uno dei sistemi vulcanici più complessi e studiati al mondo (Figura 1.2). L'area è caratterizzata da una caldera di origine quaternaria, modellata da numerosi eventi eruttivi esplosivi e da episodi di "caldera forming", che hanno determinato la formazione di depressioni, rilievi e crateri di origine vulcanica. La stratigrafia mostra alternanze di depositi piroclastici, tufi e colate di lava, che testimoniano la variabilità delle eruzioni nel corso del tempo.

Tra gli eventi più significativi ci sono:

Eruzione dell'Ignimbrite Campana (circa 40.000 anni fa) (**Civetta et al., 1997**) [1], che ha generato depositi piroclastici di vasta estensione e contribuito alla formazione della caldera attuale;

Eruzione del Tufo Giallo Napoletano (circa 15.000 anni fa) (**Wohletz, 1995**) [10], responsabile della creazione di nuovi crateri e colline e della rimodellazione del paesaggio preesistente;

Eruzioni storiche minori, tra cui l'episodio del 1538 che ha formato il celebre Monte Nuovo (**Di Vito et al., 1987**) [3], l'ultimo vulcano emerso della caldera.

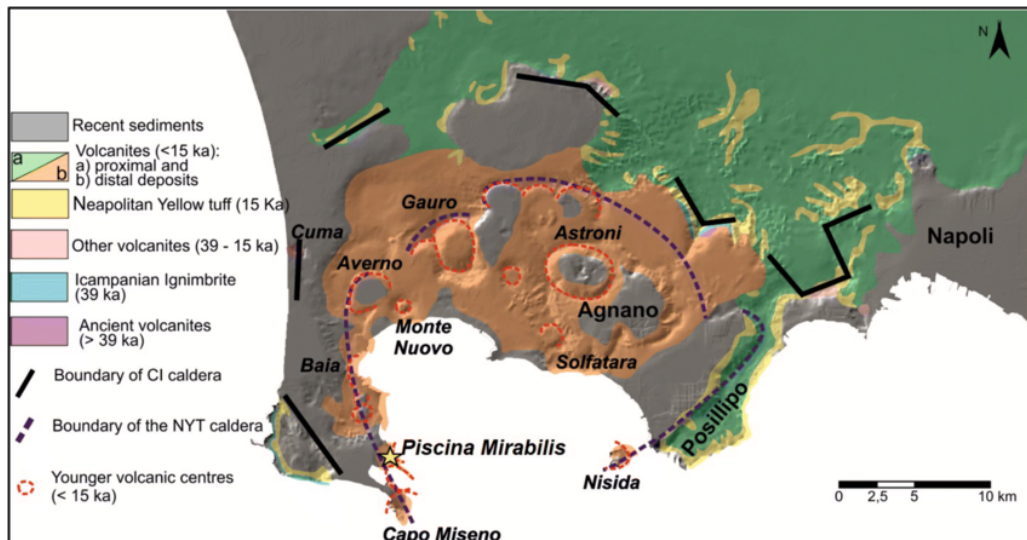


Figura 1.2: Schema geologico semplificato dei Campi Flegrei **Modificata da Orsi et al. (1996) [8]**.

La continua attività geotermica e i fenomeni di bradisismo, cioè il lento sollevamento e subsidenza del suolo, testimoniano che il sistema vulcanico sia ancora attivo.

1.3 Obiettivi del lavoro

L'obiettivo di questa tesi è analizzare le deformazioni del suolo nell'area dei Campi Flegrei utilizzando dati InSAR multitemporali, con l'intento di osservare le variazioni e le evoluzioni del terreno nel tempo. L'approccio multitemporale consente di cogliere dinamiche di sollevamento e subsidenza che potrebbero non essere evidenti in osservazioni isolate, offrendo una prospettiva più completa dei processi vulcanici in atto. L'uso del pacchetto `ggridges` in RStudio permette di rappresentare e confrontare graficamente le variazioni altimetriche della superficie terrestre, facilitando l'individuazione di trend e fluttuazioni significative per il monitoraggio e la comprensione del sistema vulcanico.

Capitolo 2

Metodi

In questo capitolo vengono esposti i metodi utilizzati per l'acquisizione dei dati e la loro analisi multitemporale.

2.1 Acquisizione dei dati e tecnologia InSAR

Per l'analisi condotta in questo studio sono stati utilizzati dati satellitari radar provenienti dalla missione Sentinel-1, parte del programma europeo Copernicus (**ESA, 2025**) [5]. Sentinel-1 è dotato di radar ad apertura sintetica (SAR), che permette di acquisire immagini della superficie terrestre indipendentemente dalle condizioni meteorologiche e dalla presenza di luce solare, garantendo osservazioni costanti e continue nel tempo.

Un esempio di immagine radar acquisita da Sentinel-1 è mostrato in Figura 2.1, evidenziando le differenze di intensità del segnale riflesse da diverse tipologie di superficie.

La tecnologia SAR funziona emettendo onde elettromagnetiche verso la superficie terrestre. Queste onde vengono riflesse dal terreno e ricevute nuovamente dal sensore, che misura sia l'ampiezza del segnale riflesso sia la sua fase. La fase rappresenta lo sfasamento dell'onda elettromagnetica rispetto all'onda trasmessa e fornisce informazioni precise sulla distanza tra il satellite e la superficie terrestre. Piccole variazioni di distanza, dell'ordine di millimetri, causate da fenomeni di sollevamento o subsidenza del terreno, possono quindi essere rilevate confrontando la fase di due o più immagini acquisite in tempi differenti.

L'analisi interferometrica di immagini SAR, nota come *Interferometric Synthetic Aperture Radar* (InSAR), sfrutta proprio la differenza di fase tra coppie di immagini radar acquisite nello stesso punto del terreno in momenti diversi (**Massonnet et al., 1993**) [7]. Creando un *interferogramma*, è possibile visualizzare le variazioni altimetriche della superficie terrestre con elevata risoluzione spaziale (Figura 2.2).

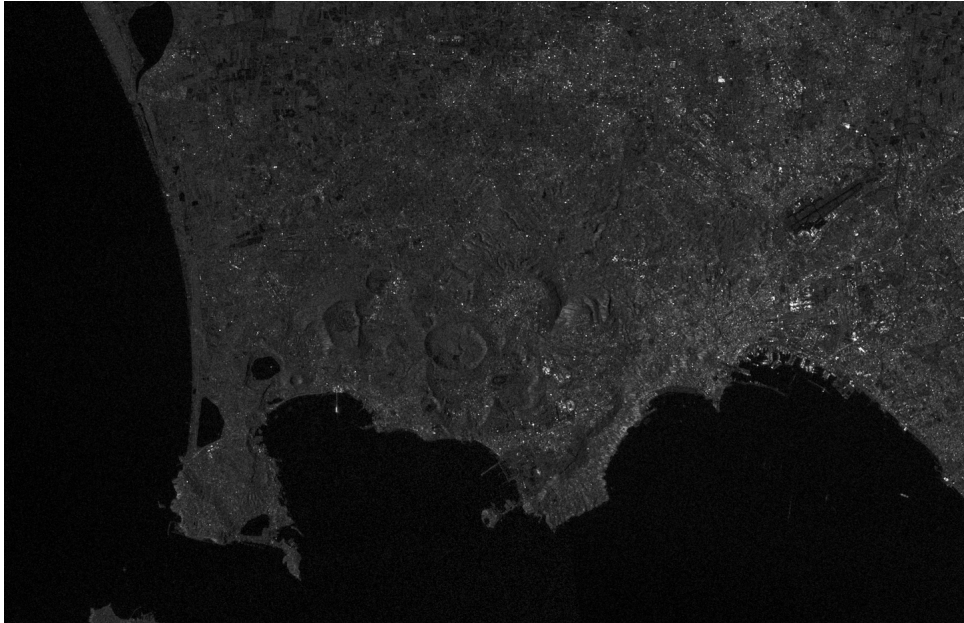


Figura 2.1: Esempio di immagine radar acquisita dal satellite Sentinel-1 (ESA, 2025) [5].

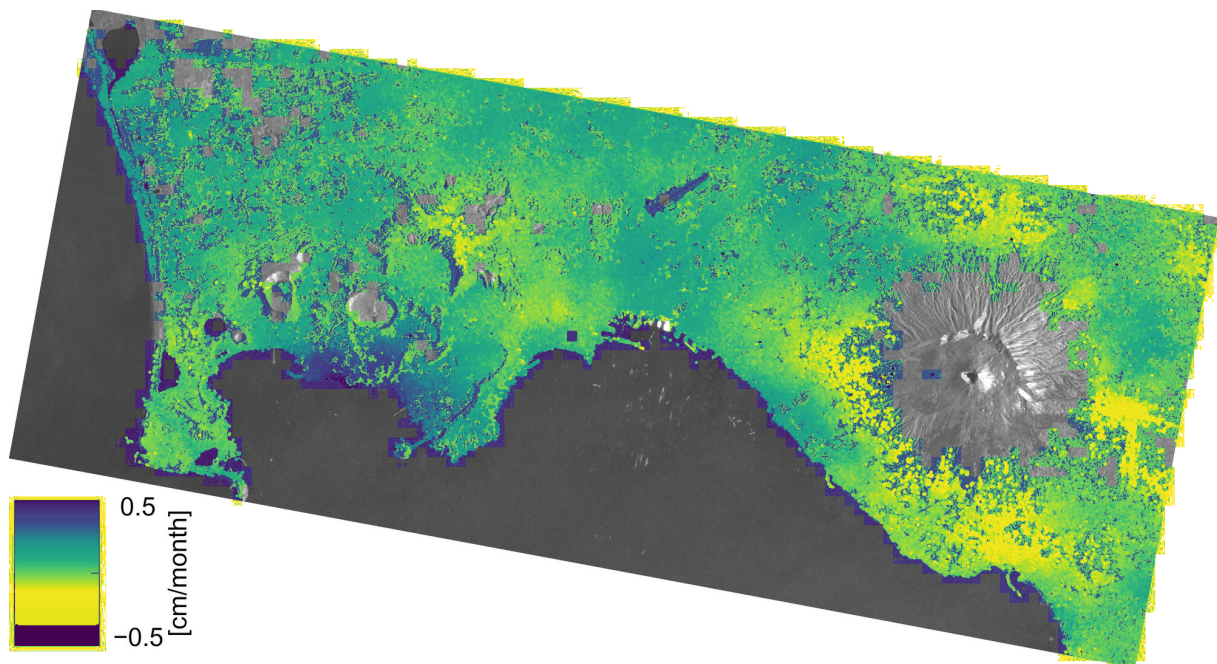


Figura 2.2: Esempio di interferogramma InSAR dei Campi Flegrei che mostra variazioni della superficie terrestre (ESA, 2025) [5].

Nel caso dei Campi Flegrei, l'uso di dati InSAR permette di rilevare variazioni del terreno ad alta precisione, fornendo informazioni per comprendere i processi geodinamici in atto e supportare attività di monitoraggio del rischio vulcanico (Tan et al., 2025; Del Monte et al., 2010) [9, 2].

Poiché i dati InSAR sono caratterizzati da un'elevata complessità e richiedono notevoli risorse computazionali per l'elaborazione, attività che di norma vengono svolte da società

specializzate dotate di server dedicati e software avanzati, per il presente studio è stata scelta la piattaforma EGMS (**European Ground Motion Service, 2025**) [4]. Tale piattaforma consente di accedere a dati InSAR già processati, riducendo significativamente i tempi di lavoro e permettendo di focalizzarsi direttamente sull'analisi scientifica. Grazie a EGMS, è stato possibile ottenere informazioni dettagliate sulle variazioni altimetriche della superficie terrestre garantendo la compatibilità dei dati con strumenti come QGIS per ulteriori elaborazioni e l'estrazione di dataset mirati.

2.2 Estrazione dei dati EGMS tramite QGIS

Dopo aver prelevato i dati già elaborati dalla piattaforma EGMS (**European Ground Motion Service, 2025**) [4], essi sono stati importati all'interno del software QGIS, un ambiente GIS open-source che consente la gestione e la visualizzazione di informazioni geospaziali complesse. Durante l'importazione, i dati sono stati georeferenziati correttamente nel sistema di riferimento EPSG:3035 (ETRS89 / LAEA Europe), garantendo un allineamento preciso con le coordinate spaziali della zona di studio.

Una volta caricati, i punti dati sono stati visualizzati sulla mappa: ogni cerchietto colorato rappresenta una posizione in cui il satellite ha acquisito informazioni. La colorazione dei punti riflette la velocità media del terreno, positiva in caso di sollevamento e negativa in caso di subsidenza. Alcune aree della mappa presentano punti mancanti, dovuti alla mancanza di riflettori naturali adeguati al segnale radar, fenomeno tipico dei dati InSAR. Questa rappresentazione consente di avere una panoramica immediata della distribuzione spaziale delle deformazioni del suolo.

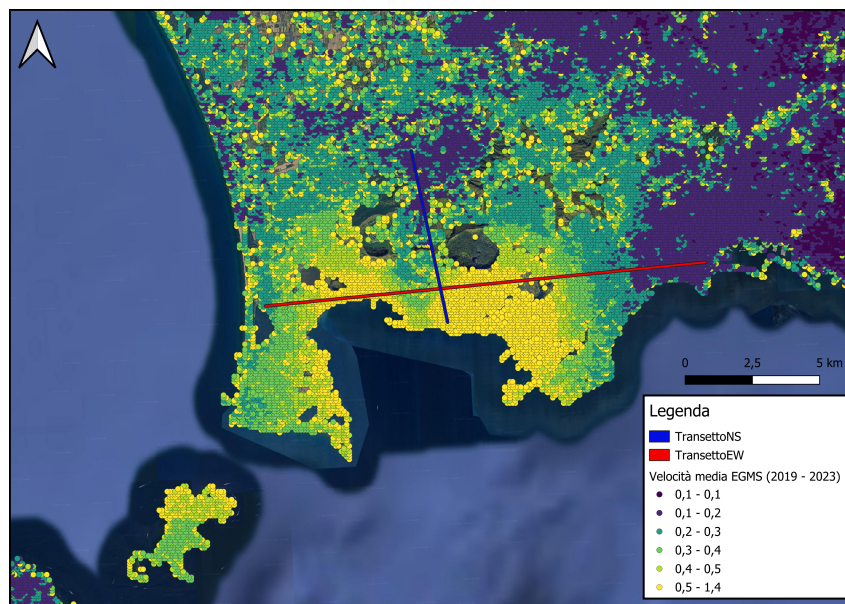


Figura 2.3: Visualizzazione dei punti EGMS georeferenziati in QGIS, con colorazione in base alla velocità media del terreno. Sono visibili il due transetti: di colorazione rossa il Transetto E-w e di colorazione blu il Transetto N-S.

Successivamente, sono stati disegnati due transetti principali sull'area di interesse: uno orientato secondo la direzione Est–Ovest e l'altro lungo la direzione Nord–Sud. Questi transetti sono stati creati come linee vettoriali tramite lo strumento *disegna nuovo layer* di QGIS. Le linee create sono state salvate come layer vettoriali permanenti, permettendo di utilizzarle per le successive operazioni di selezione e analisi.

Per poter isolare i punti lungo i transetti, è stato applicato uno strumento di buffering alle linee. Il buffer consiste in una fascia di larghezza definita (in questo caso 50 metri) attorno al transetto, generando un poligono continuo che rappresenta il corridoio di interesse. Questo passaggio ha permesso di selezionare tutti i punti dati EGMS che intersecano la zona immediatamente circostante le linee dei transetti, mantenendo la precisione spaziale e consentendo di concentrare l'analisi solo sulle aree rilevanti.

Una volta creato il buffer, i punti all'interno di ciascun corridoio sono stati selezionati tramite la funzione *Seleziona per posizione* di QGIS, impostando la relazione spaziale *intersezione*. In questo modo, sono stati identificati esclusivamente i punti appartenenti al transetto, escludendo tutti quelli al di fuori del buffer. Tale selezione è stata verificata visivamente e attraverso la tabella attributi del layer, assicurando che solo i dati pertinenti venissero considerati.

Infine, i punti selezionati lungo ciascun transetto sono stati esportati in formato .csv, generando due dataset separati: `TransettoEW.csv` per il transetto Est–Ovest e `TransettoNS.csv` per il transetto Nord–Sud. Questi file contengono tutte le informazioni necessarie per le successive analisi quantitative e statistiche delle variazioni altimetriche del terreno, mantenendo la risoluzione spaziale originale dei dati InSAR e garantendo la coerenza con il sistema di riferimento geospaziale.

2.3 Analisi dei dati tramite RStudio e metodo multi-temporale

Dopo l'importazione dei dati in RStudio, l'analisi è stata condotta utilizzando i valori di deformazione presenti nei file .csv estratti da QGIS, relativi ai due transetti selezionati (Nord-Sud e Ovest-Est). L'approccio multitemporale adottato ha permesso di studiare le variazioni della superficie terrestre nel tempo e di identificare trend e fluttuazioni.

2.3.1 Caricamento dei pacchetti e preparazione dell'ambiente

Per prima cosa sono stati caricati i pacchetti principali per la gestione e la visualizzazione dei dati:

```
library(readxl)
library(tidyverse)
library(lubridate)
library(ggribes)
library(dplyr)
library(ggplot2)
```

I pacchetti `tidyverse` e `dplyr` sono stati utilizzati per la manipolazione dei dati, mentre `lubridate` ha permesso di gestire facilmente le date. `ggribes` e `ggplot2` sono stati impiegati per la visualizzazione multitemporale tramite diagrammi a densità sovrapposte.

2.3.2 Importazione e trasformazione dei dati

I dati dei due transetti sono stati letti in RStudio mediante la funzione `read_delim`, che consente di rilevare automaticamente il separatore dei file CSV. Nel caso del transetto Nord-Sud:

```
transettoNS <- read_delim("Percorso/TransettoNS.csv",
                          delim = NULL,
                          guess_max = 10000,
                          trim_ws = TRUE) %>%
  mutate(transetto = "Transetto NS")
```

Per uniformità, è stata aggiunta una colonna fissa `transetto` per distinguere i due dataset. Successivamente, i dati sono stati trasformati in formato “long” tramite la funzione `pivot_longer`, rendendo possibile la gestione di più date in un’unica colonna:

```
static_cols <- c("pid", "easting", "northing", "height", "rmse",
                 "mean_veloc", "mean_vel_1", "accelerati", "accelera_1",
                 "seasonalit", "seasonal_1", "transetto")

transettoNS_long <- transettoNS %>%
  pivot_longer(cols = -all_of(static_cols),
               names_to = "data",
               values_to = "valore") %>%
  mutate(data = ymd(data)) %>%
  arrange(data)
```

In questo modo, ogni riga rappresenta il valore di deformazione di un punto (`pid`) in una specifica data, semplificando le successive elaborazioni multitemporali.

Per ridurre il numero di curve nei grafici e facilitare la lettura, sono state selezionate solo alcune date chiave (circa ogni sei mesi):

```
date_selezionate <- transettoNS_long %>%
  distinct(data) %>%
  arrange(data) %>%
  slice(seq(1, n(), by = 6)) %>% pull(data)

transettoNS_filtrato <- transettoNS_long %>%
  filter(data %in% date_selezionate)
```

2.3.3 Visualizzazione dei transetti

I profili dei due transetti sono stati visualizzati tramite grafici a punti con linee di tendenza `geom_smooth`, evidenziando la distribuzione dei valori nel tempo:

```
ggplot(transettoNS_filtrato, aes(x = northing, y = valore,
                                color = as.factor(format(data, "%Y-%m")))) +
  geom_point(alpha = 0.6, size = 1.2) +
  geom_smooth(se = FALSE, color = "black", linewidth = 1.2) +
  scale_color_manual(values = palette_date, name = "Data") +
  scale_x_reverse(name = "Nord - Sud") +
  labs(title = "Profilo di Spostamento lungo il Transetto N-S",
       y = "Spostamento (mm)") +
  theme_minimal()
```

Analogamente, per il transetto Ovest-Est:

```
ggplot(transettoEW_filtrato, aes(x = easting, y = valore,
                                color = as.factor
                                  (format(data, "%Y-%m")),
                                group = 1)) +
  geom_point(alpha = 0.6, size = 1.2) +
  geom_smooth(se = FALSE, color = "black", method = "loess") +
  scale_color_manual(values = palette_date, name = "Data") +
  labs(title = "Profilo di Spostamento lungo il Transetto W-E",
       x = "Ovest - Est",
       y = "Spostamento (mm)") +
  theme_minimal()
```


Questi grafici preliminari (Figura 3.1 e Figura 2.5) permettono di osservare le variazioni di spostamento lungo ciascun transetto, ma non evidenziano immediatamente l'evoluzione temporale complessiva.

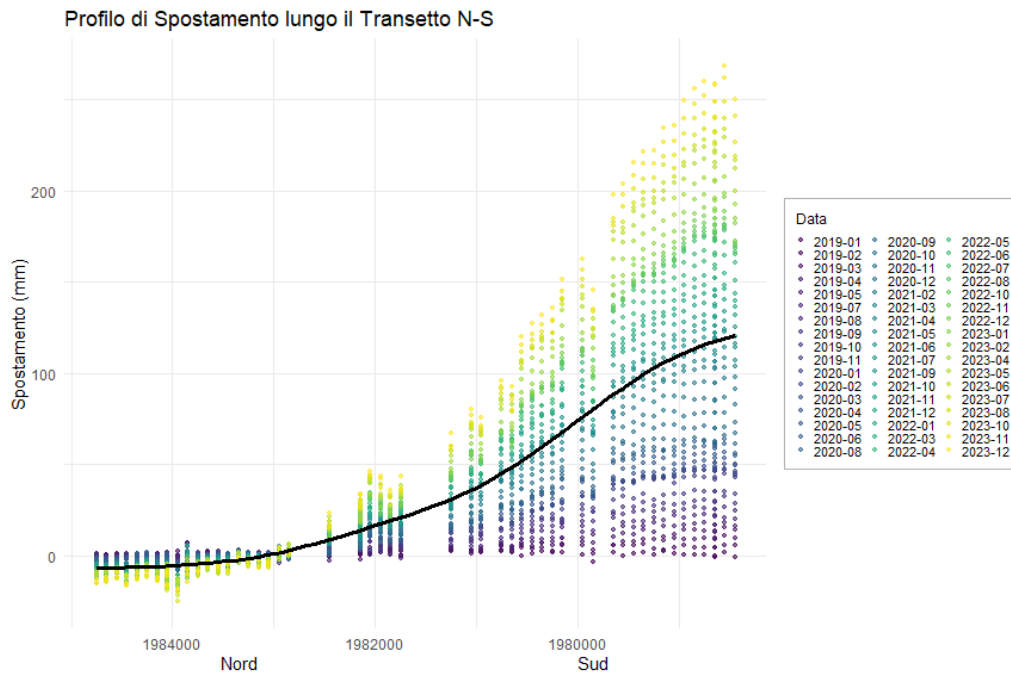


Figura 2.4: Profilo dei valori di deformazione lungo il transetto Nord-Sud. Ogni punto rappresenta la misura di spostamento verticale del terreno in un determinato punto (`pid`) e data di acquisizione. Le linee nere mostrano la tendenza generale dei dati tramite `geom_smooth`. Le diverse colorazioni indicano date differenti, selezionate circa ogni sei mesi, per evidenziare le variazioni nel tempo.

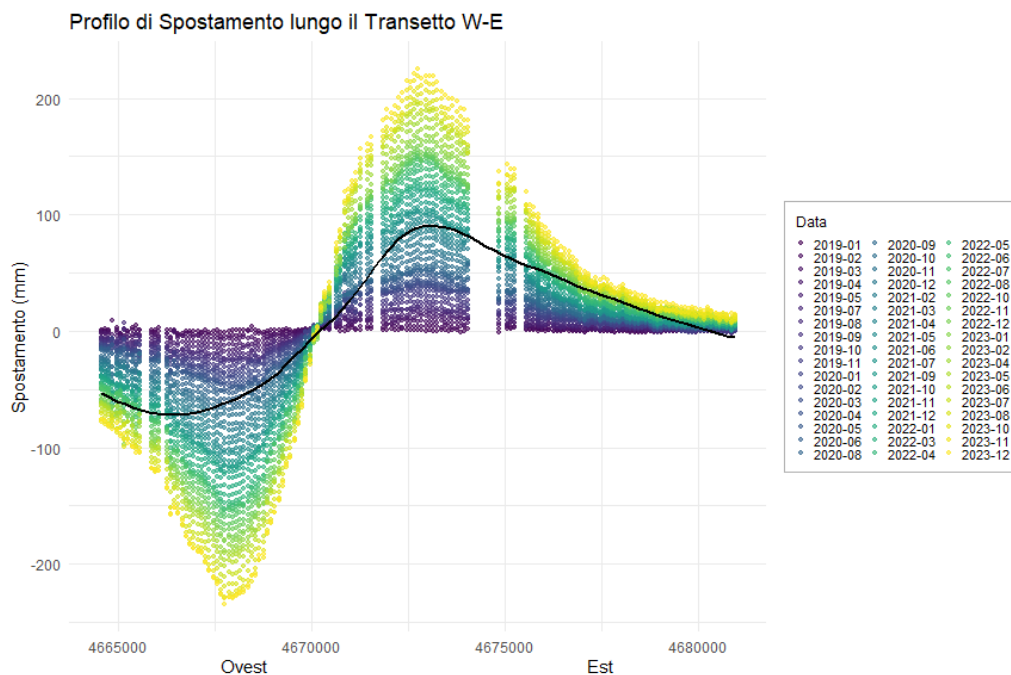


Figura 2.5: Profilo dei valori di deformazione lungo il transetto Ovest-Est.

2.3.4 Analisi multitemporale con ridge plots

Per ottenere una rappresentazione chiara delle variazioni nel tempo, è stata utilizzata la funzione `geom_ridgeline` del pacchetto `ggbridges`. I dati sono stati prima rielaborati tramite la funzione `crea_ridge_data`, che calcola lo scostamento rispetto alla prima data (t_0) e definisce l'indice verticale per separare le curve:

```
crea_ridge_data <- function(df){
  df <- df %>% arrange(data)
  prima_data <- df %>%
    filter(data == min(data)) %>%
    select(pid, valore) %>%
    rename(valore0 = valore)
  df_diff <- df %>%
    left_join(prima_data, by = "pid") %>%
    mutate(diff = valore - valore0,
           data_factor = factor(format(data, "%Y-%m"),
                                levels = rev(unique(format(data, "%Y-%m")))),
           y_index = as.numeric(data_factor),
           y_plot = y_index * 50)
  return(df_diff)
}
```

Questa trasformazione ha permesso di generare i diagrammi multitemporali, in cui ogni curva rappresenta una data specifica e l'altezza indica la variazione di deformazione rispetto a t_0 .

```
transettoNS_plot <- crea_ridge_data(transettoNS_long)

ggplot(transettoNS_plot,
       aes(x = northing, y = y_plot, height = diff, group =
           data_factor)) +
  geom_ridgeline(scale = 1.5, alpha = 0.6,
                fill = "steelblue",
                color = "black") +
  scale_x_reverse() +
  scale_y_continuous(breaks = transettoNS_plot$y_plot
                    [!duplicated(transettoNS_plot$y_plot)],
                    labels = rev(unique(transettoNS_plot$data_factor))) +
```

```
labs(title = "Evoluzione deformazione - Transetto N-S",
     x = "Nord - Sud",
     y = "Data",
     subtitle = "Spostamento relativo rispetto alla prima data (t0 = 0)") +
theme_minimal()
```

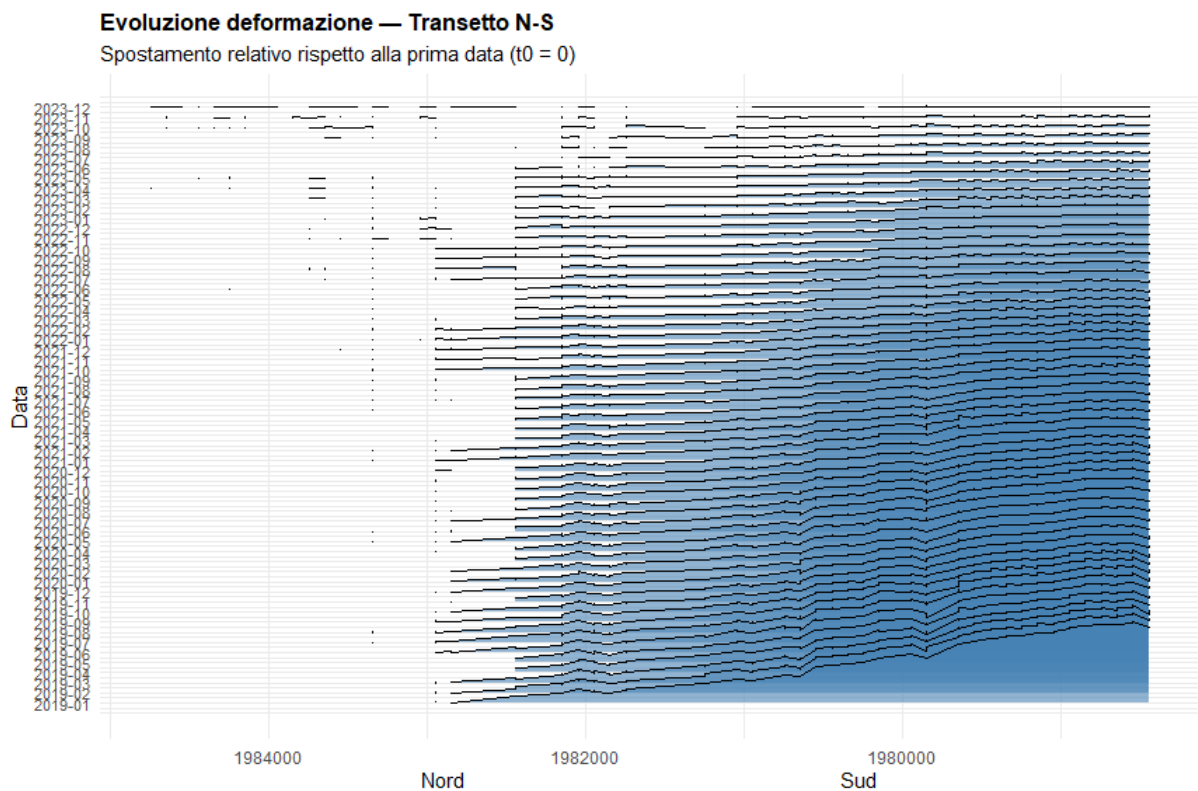


Figura 2.6: Diagramma a densità sovrapposte (ridge plot) del transetto Nord-Sud. Ogni curva rappresenta lo spostamento relativo rispetto alla prima data (t_0), evidenziando sollevamenti o subsidenze nel tempo. L'asse verticale rappresenta le diverse date, mentre l'asse orizzontale indica la posizione lungo il transetto. Le curve sono separate verticalmente per rendere visibili le variazioni tra le diverse date.

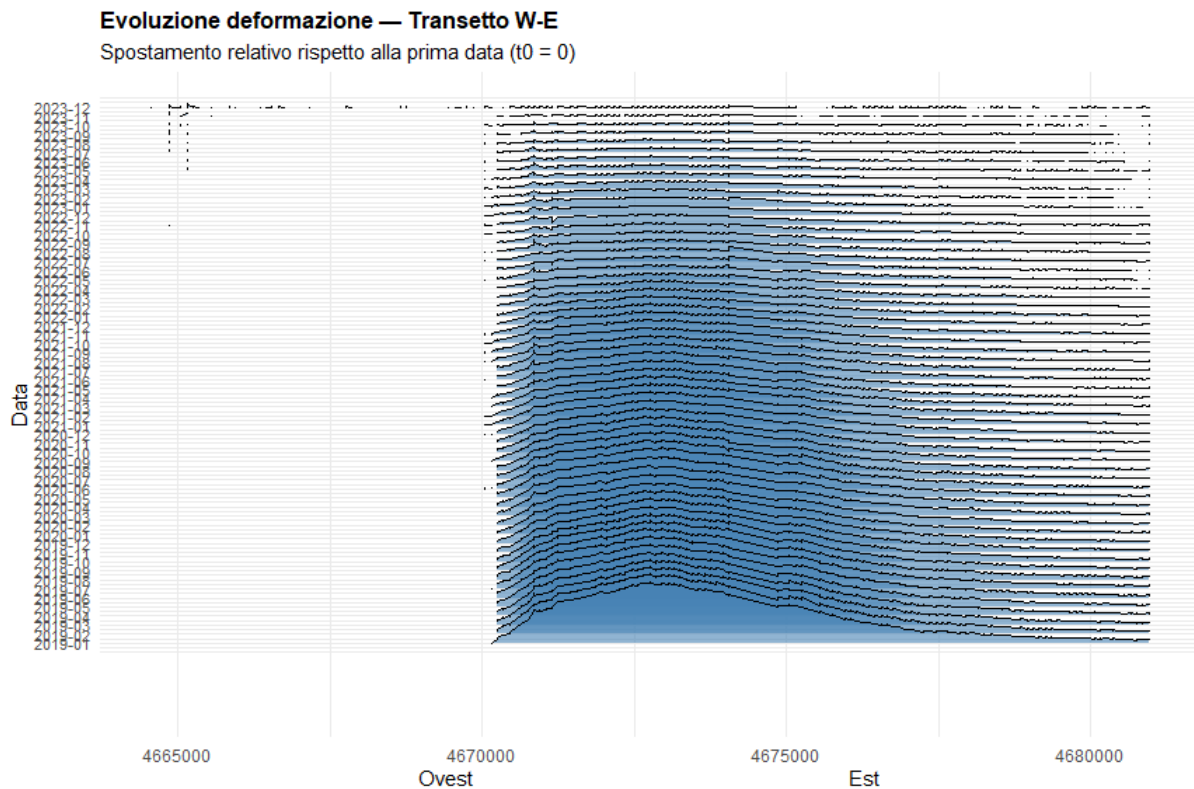


Figura 2.7: Diagramma a densità sovrapposte (ridge plot) del transetto Ovest-Est.

Per il transetto W-E è stata applicata la stessa procedura, ottenendo un quadro comparativo completo dell'evoluzione delle deformazioni nel tempo (Figura 3.2 e Figura 2.7).

2.3.5 Raffinamento dei grafici

Per migliorare la leggibilità, le curve sono state distanziate verticalmente e filtrate selezionando solo alcune date significative. La funzione `crea_ridge_data_filtrata` gestisce automaticamente il filtraggio e la normalizzazione dei valori:

```
transettoNS_plot <- crea_ridge_data_filtrata(transettoNS_long, step = 5)

ggplot(transettoNS_plot,
       aes(x = northing, y = y_plot, height = diff,
           group = data_factor, fill = diff)) +
  geom_ridgeline_gradient(scale = 1.5, alpha = 0.8) +
  scale_fill_gradient(low = "lightblue", high = "blue",
                     name = "Spostamento (mm)") +
  scale_y_continuous(breaks = transettoNS_plot$y_plot
                     [!duplicated(transettoNS_plot$y_plot)],
                     labels = transettoNS_plot$data_factor
                     [!duplicated(transettoNS_plot$y_plot)]) +
```

```
scale_x_reverse() +
labs(title = "Evoluzione deformazione - Transetto N-S",
      x = "Nord - Sud",
      y = "Data",
      subtitle = "Spostamento relativo rispetto alla prima data (t0 = 0)") +
theme_minimal()
```

Grazie a questo approccio, l'analisi multitemporale permette di osservare non solo i valori assoluti di deformazione, ma anche i pattern temporali, identificando sollevamenti, subsidenze o episodi di accelerazione del fenomeno, fornendo così una rappresentazione più chiara e quantitativa dell'evoluzione delle deformazioni (Figura 3.3 e Figura 2.9).

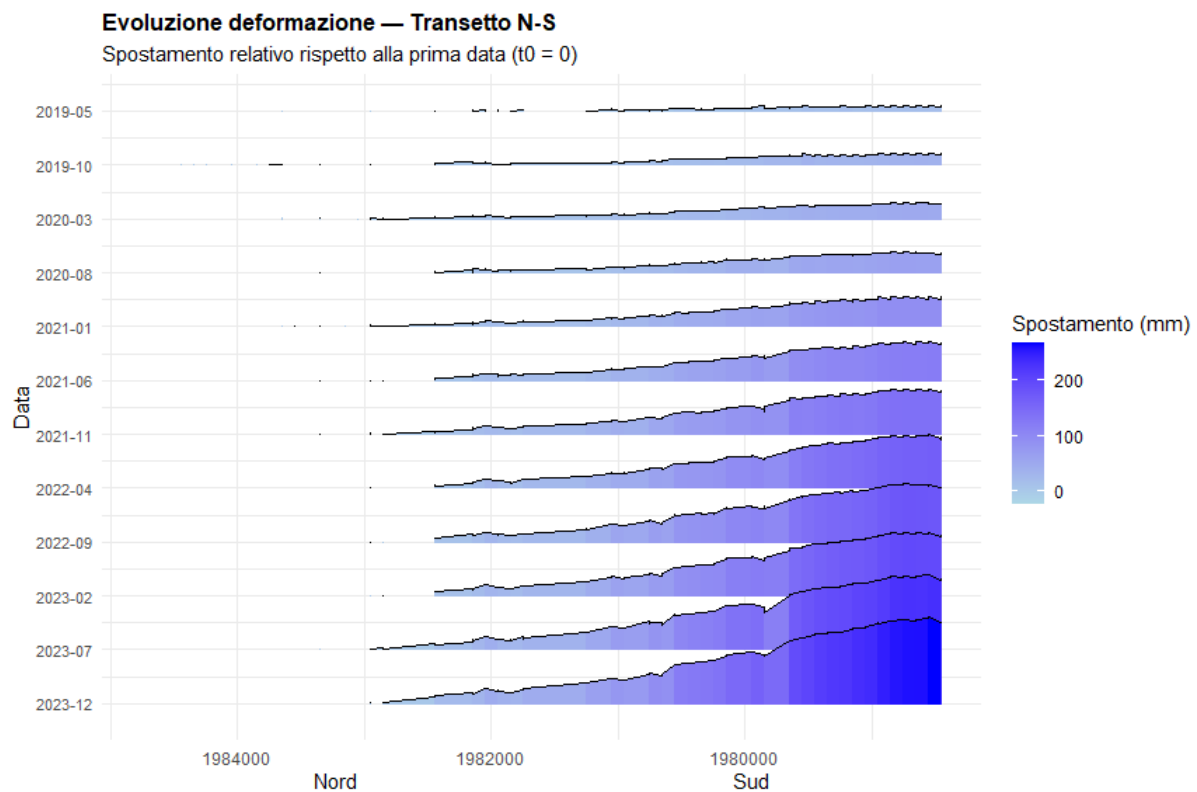


Figura 2.8: Ridge plot filtrato e con gradienti di colore per il transetto Nord-Sud. Il colore delle curve indica l'entità dello spostamento (mm), dal blu chiaro (basso) al blu intenso (alto). Le curve sono state selezionate per mostrare solo date significative, migliorando la leggibilità del grafico.

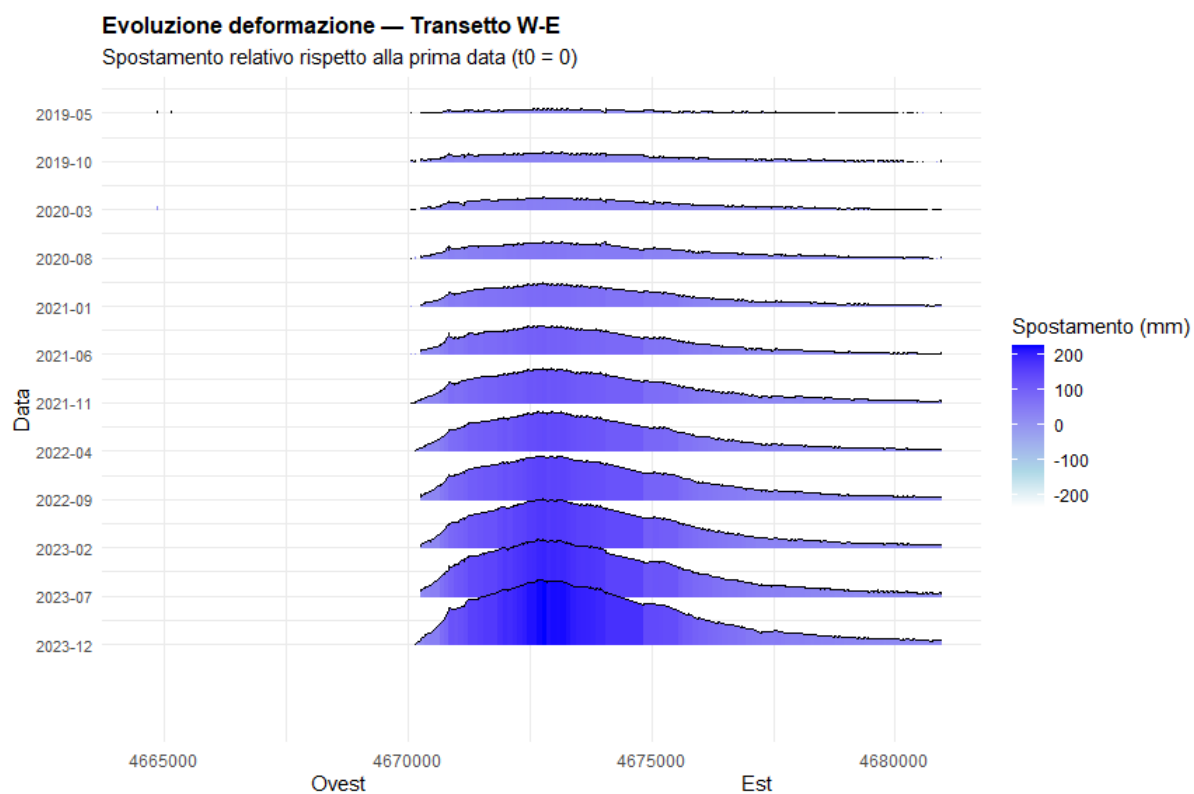


Figura 2.9: Ridge plot filtrato e con gradienti di colore per il transetto Ovest-Est.

Capitolo 3

Risultati

3.1 Osservazione dei grafici

L'analisi dei dati dei transetti Nord-Sud (N-S) e Ovest-Est (W-E), mediante le rappresentazioni grafiche prodotte, offre una visione approfondita dell'evoluzione spaziale e temporale delle deformazioni del suolo. L'approccio combinato che integra grafici a punti con linee di tendenza e ridge plot multitemporali consente non solo di visualizzare i valori assoluti di spostamento, ma anche di cogliere l'andamento dinamico dei fenomeni deformativi lungo le due direzioni principali, permettendo un'interpretazione dettagliata dei pattern osservati.

3.1.1 Transetto N-S

Per il transetto N-S, il primo grafico a punti con linee di tendenza (Figura 3.1) evidenzia chiaramente la stabilità della porzione settentrionale, caratterizzata da valori di spostamento relativamente uniformi e privi di variazioni significative nel tempo. In contrasto, la parte meridionale del transetto mostra una marcata instabilità: i dati indicano un sollevamento del terreno consistente, con valori che superano i 200 millimetri nell'arco di circa quattro anni. Questa distribuzione eterogenea suggerisce che i fenomeni deformativi non siano uniformi lungo l'asse N-S, con aree di maggiore attività concentrate nella porzione meridionale.

La complessità del fenomeno risulta ulteriormente chiarita mediante i ridge plot multitemporali (Figura 3.2) e i ridge plot raffinati con gradiente di colore (Figura 3.3). In queste rappresentazioni, ogni curva sovrapposta corrisponde a una data di acquisizione, permettendo di seguire in maniera dettagliata l'evoluzione temporale dei singoli punti lungo il transetto. Le variazioni del sollevamento nella parte meridionale emergono con maggiore evidenza, mentre le porzioni settentrionali confermano una sostanziale stabilità. L'uso del gradiente di colore nei grafici finali enfatizza le zone di maggiore spostamento,

consentendo di distinguere rapidamente aree critiche da quelle più stabili e facilitando l'interpretazione dei pattern spaziali e temporali.

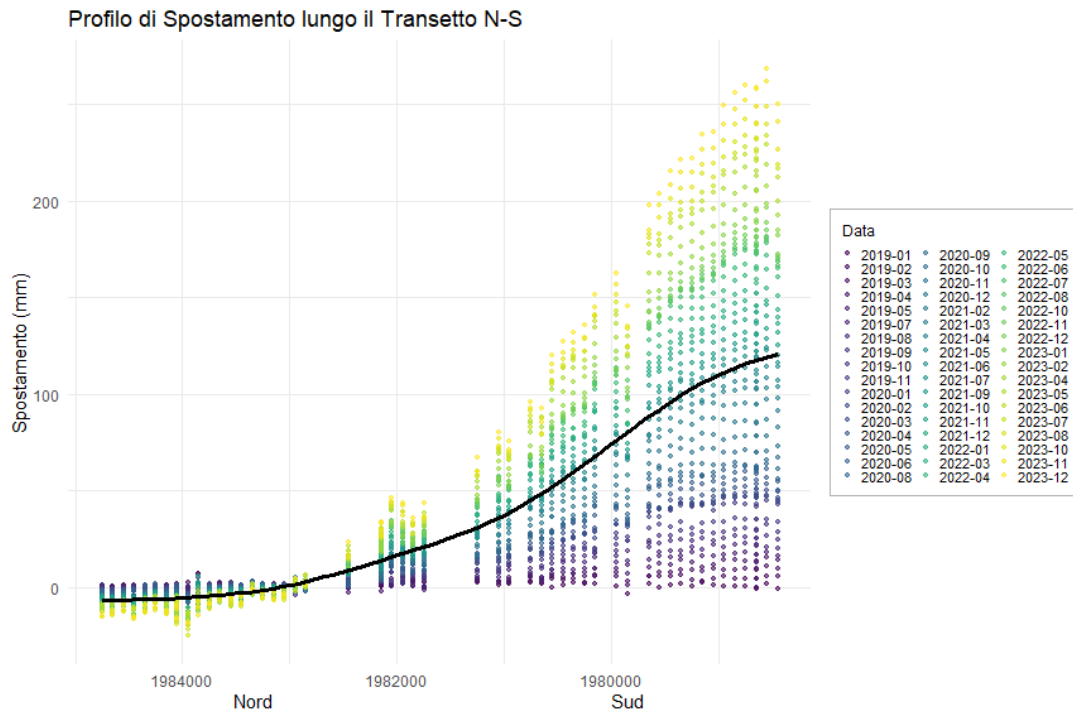


Figura 3.1: Profilo dei valori di deformazione lungo il transetto Nord-Sud.

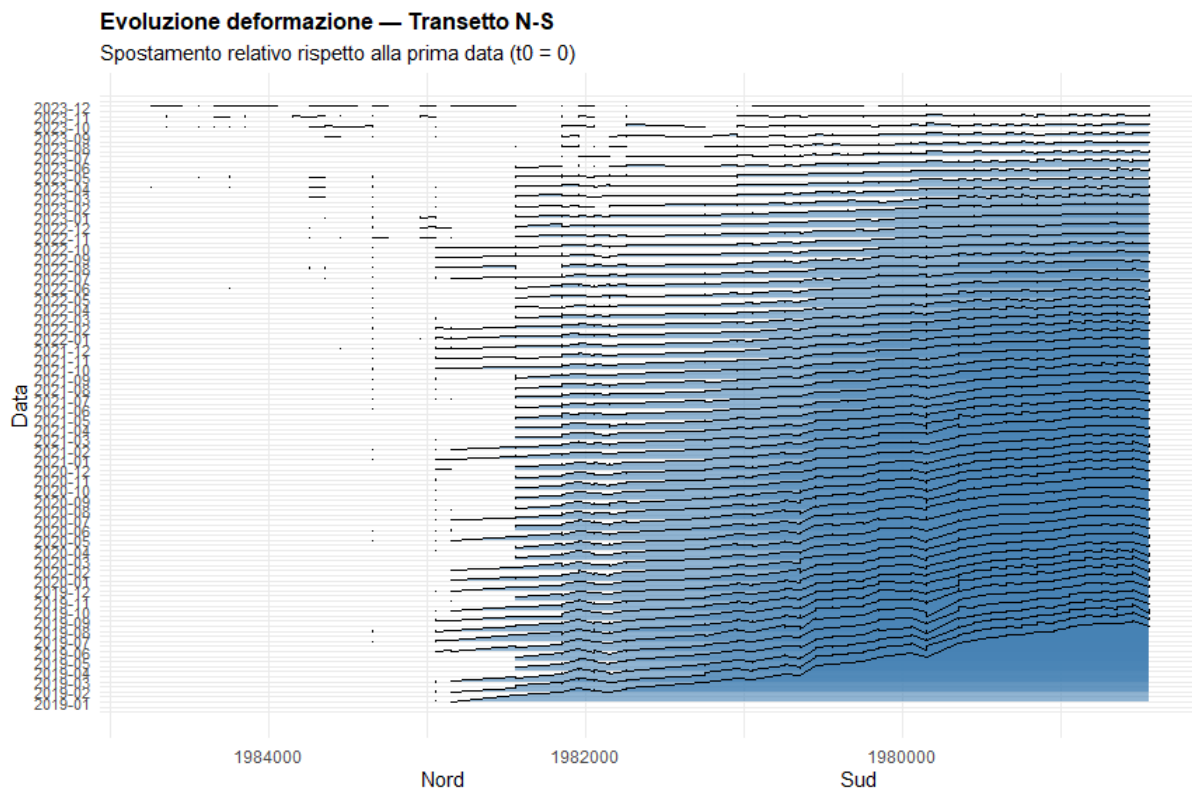


Figura 3.2: Diagramma a densità sovrapposte (ridge plot) del transetto Nord-Sud.

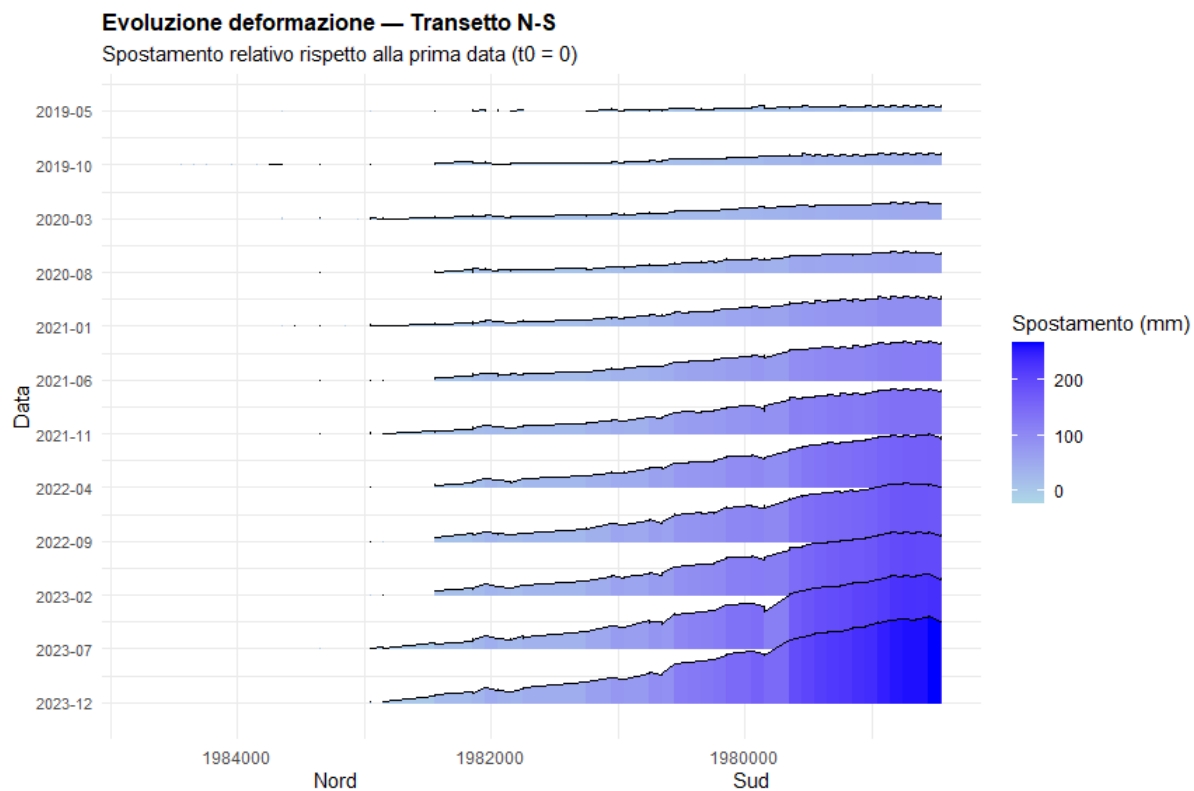


Figura 3.3: Ridge plot filtrato e con gradienti di colore per il transetto Nord-Sud.

3.1.2 Transetto W-E

Per il transetto W-E, la situazione si presenta più complessa e meno coerente con quanto atteso sulla base di dati di letteratura e osservazioni satellitari. Secondo le fonti disponibili, ci si aspetterebbe un sollevamento minimo ai margini del transetto e un incremento progressivo verso il centro, con valori di spostamento che superano i 200 millimetri nell'arco temporale analizzato. Tuttavia, già dal primo grafico a punti (Figura 3.4) emergono discrepanze significative rispetto al comportamento previsto. Nella parte orientale del transetto, il sollevamento osservato risulta coerente con le aspettative, mentre verso ovest il trend si inverte progressivamente, culminando in una subsidenza marcata nelle aree centrali.

I ridge plot (Figura 3.5) e i ridge plot raffinati (Figura 3.6) confermano questa complessa dinamica. In particolare, la porzione centro-orientale mostra chiaramente il sollevamento previsto, mentre la zona centro-occidentale presenta valori negativi che, a causa della rappresentazione filtrata, non vengono visualizzati nel grafico. Tale osservazione evidenzia la variabilità spaziale dei fenomeni lungo il transetto W-E e la necessità di considerare attentamente sia i dati assoluti che quelli relativi rispetto al tempo iniziale.

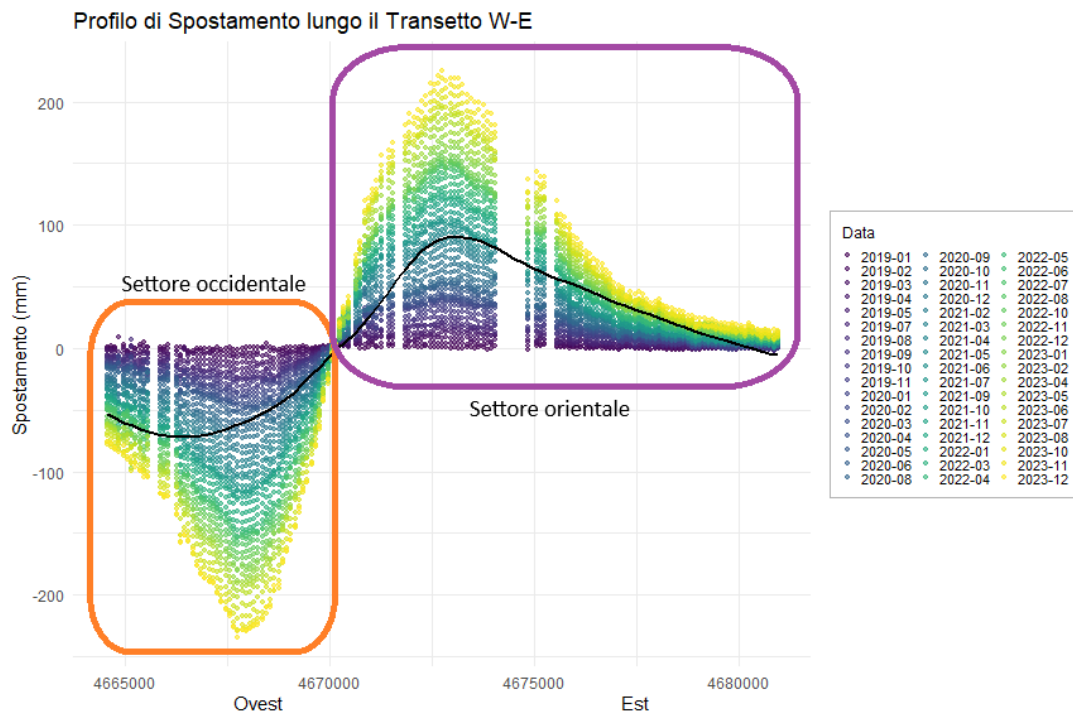


Figura 3.4: Profilo dei valori di deformazione lungo il transetto Ovest-Est diviso in settori: occidentale (arancione) e orientale (viola).

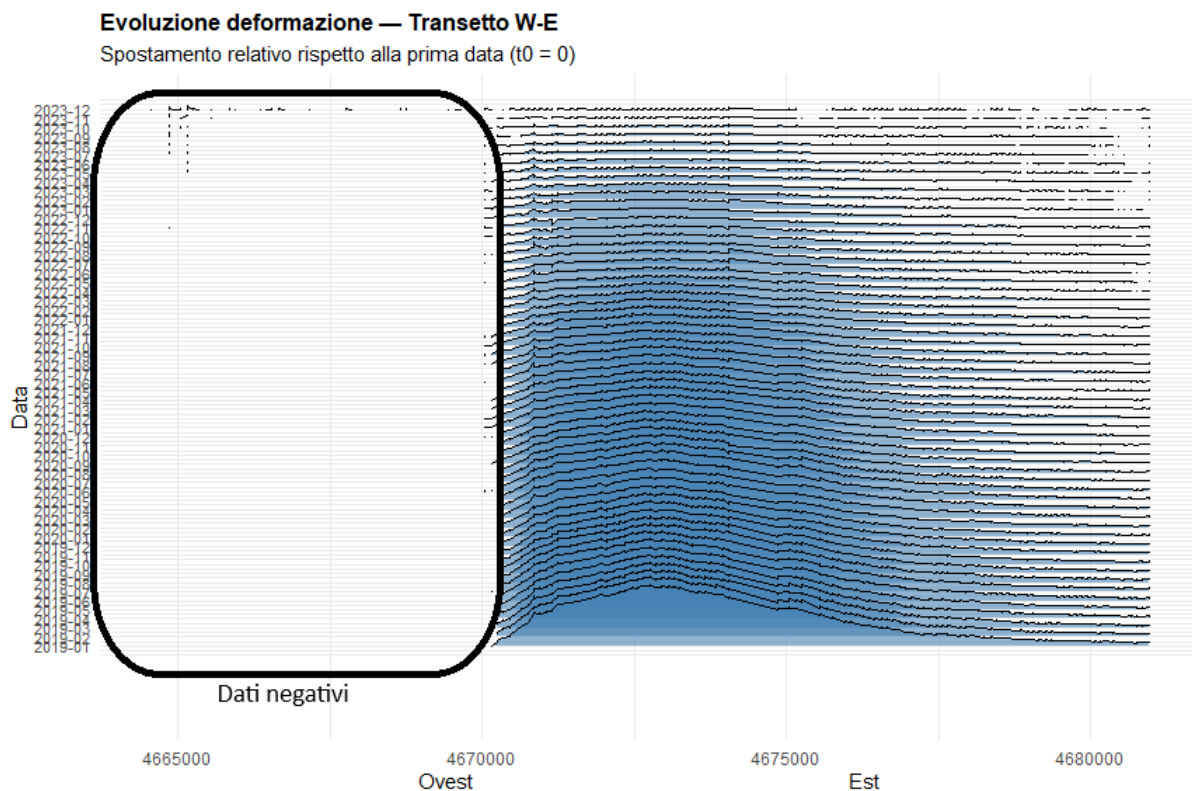


Figura 3.5: Diagramma a densità sovrapposte (ridge plot) del transetto Ovest-Est. Viene evidenziata la zona di iatus del dato negativo.

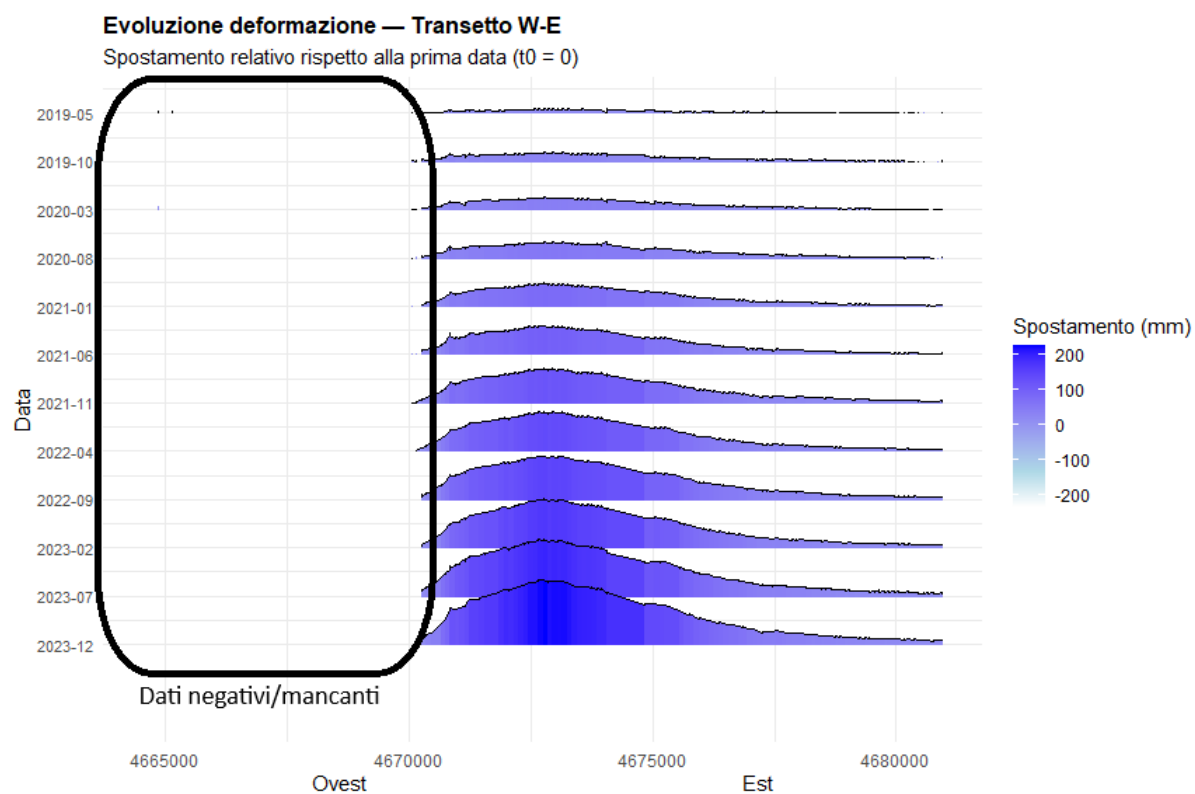


Figura 3.6: Ridge plot filtrato e con gradienti di colore per il transetto Ovest-Est. Viene evidenziata la zona di iatus del dato negativo.

Capitolo 4

Discussione

L'analisi dei risultati ottenuti lungo i due transetti principali (N-S e W-E) evidenzia comportamenti deformativi differenti, sia in termini di coerenza interna dei dati sia in relazione alle informazioni disponibili da letteratura e osservazioni indipendenti.

4.1 Transetto Nord-Sud: coerenza con il modello atteso

Il transetto Nord-Sud presenta un quadro interpretativo complessivamente coerente con le dinamiche geodinamiche note per l'area di studio. La porzione settentrionale risulta caratterizzata da condizioni di sostanziale stabilità, mentre la parte meridionale mostra un chiaro e progressivo sollevamento del terreno, con valori superiori ai 200 mm nell'intervallo temporale analizzato (Figura 3.1).

Questa tendenza è ben visibile sia nei grafici puntuali con linee di tendenza sia nei ridge plot multitemporali (Figura 3.2 e Figura 3.3), dove le curve successive mostrano uno shift verticale coerente e progressivo. Tale comportamento suggerisce un'evoluzione deformativa graduale e continua nel tempo, supportando l'ipotesi di un fenomeno regionale attivo e differenziato lungo l'asse N-S.

In questo caso, la robustezza dei dati e la loro coerenza interna consentono una lettura affidabile dell'evoluzione temporale del sollevamento, confermando l'efficacia dell'approccio multitemporale adottato.

4.2 Transetto Ovest-Est: incongruenze rispetto al quadro atteso

Viceversa, i risultati relativi al transetto Ovest-Est restituiscono un quadro più complesso e, in parte, contrastante rispetto alle aspettative basate sia su dati geofisici precedenti sia sulle evidenze satellitari disponibili in letteratura.

Secondo le informazioni note, lungo tale direttrice ci si attenderebbe una deformazione progressiva con valori di sollevamento minimi alle estremità e massimi nella sezione centrale dell'area. Tuttavia:

- nella porzione orientale del transetto si osserva un comportamento coerente con il modello previsto (Figura 2.5);
- procedendo verso ovest, il trend cambia gradualmente, fino a evidenziare **subsidenza** nelle aree centrali, in netto contrasto con quanto teoricamente atteso (Figura 2.7 e Figura 2.9).

Tale inversione di comportamento suggerisce la presenza di dati discordanti nella parte occidentale del transetto, la cui entità risulta tale da alterare la risposta spaziale teorica.

4.3 Interpretazione delle discrepanze

Le discrepanze osservate nel transetto W-E potrebbero derivare da diverse cause. Tra queste, si considerano:

- **eterogeneità locale del segnale satellitare**, dovuta a caratteristiche morfologiche o urbanistiche;
- **rumore residuo nei dati** e sensibilità del metodo differenziale adottato nel calcolo degli spostamenti relativi rispetto a t_0 ;
- **disturbi legati alla geometria dei dati SAR** e all'orientamento del transetto rispetto alla direzione di acquisizione del satellite.

Tuttavia, l'analisi suggerisce che la causa più probabile delle discrepanze sia di natura tecnica: durante il prelievo e l'elaborazione dei dati sul dispositivo locale tramite QGIS, potrebbero essersi verificati errori nell'interpretazione o nel processamento dei dati. Questa ipotesi è supportata dal fatto che l'analisi è stata ripetuta da zero tre volte, ottenendo risultati analoghi. Ciò indica che le anomalie riscontrate non derivino da fenomeni reali ma piuttosto da procedure locali di gestione dei dati.

In questo contesto, l'apparente subsidenza nella sezione centro-occidentale deve essere considerata con cautela, e ulteriori verifiche dovrebbero basarsi su dataset indipendenti o su elaborazioni eseguite su piattaforme diverse, per escludere artefatti dovuti all'elaborazione locale.

4.4 Analisi integrativa: area di Bologna

Al fine di approfondire le discrepanze osservate lungo il transetto Ovest-Est e verificare se esse fossero dovute a errori di elaborazione o a caratteristiche intrinseche dei dati, è stato condotto uno studio aggiuntivo su l'area di Bologna nota per essere soggetta a significativa subsidenza.

Sono stati estrapolati dati satellitari EGMS relativi alla nuova area e costruiti due transetti principali, denominati **TransettoBoNS** e **TransettoBoWE**, per confrontare i comportamenti deformativi con quelli dei Campi Flegrei. L'analisi dei grafici (Figura 4.1, Figura 4.3, Figura 4.2, Figura 4.4) ha permesso di valutare la coerenza dei dati rispetto alle aspettative geodinamiche riportate in letteratura.

Sia il transetto Nord-Sud che il transetto Ovest-Est mostrano un comportamento complessivamente coerente con quanto osservato in altri studi, riportato in letteratura e rilevato tramite dati satellitari, confermando la validità generale del dataset e delle dinamiche deformative analizzate.

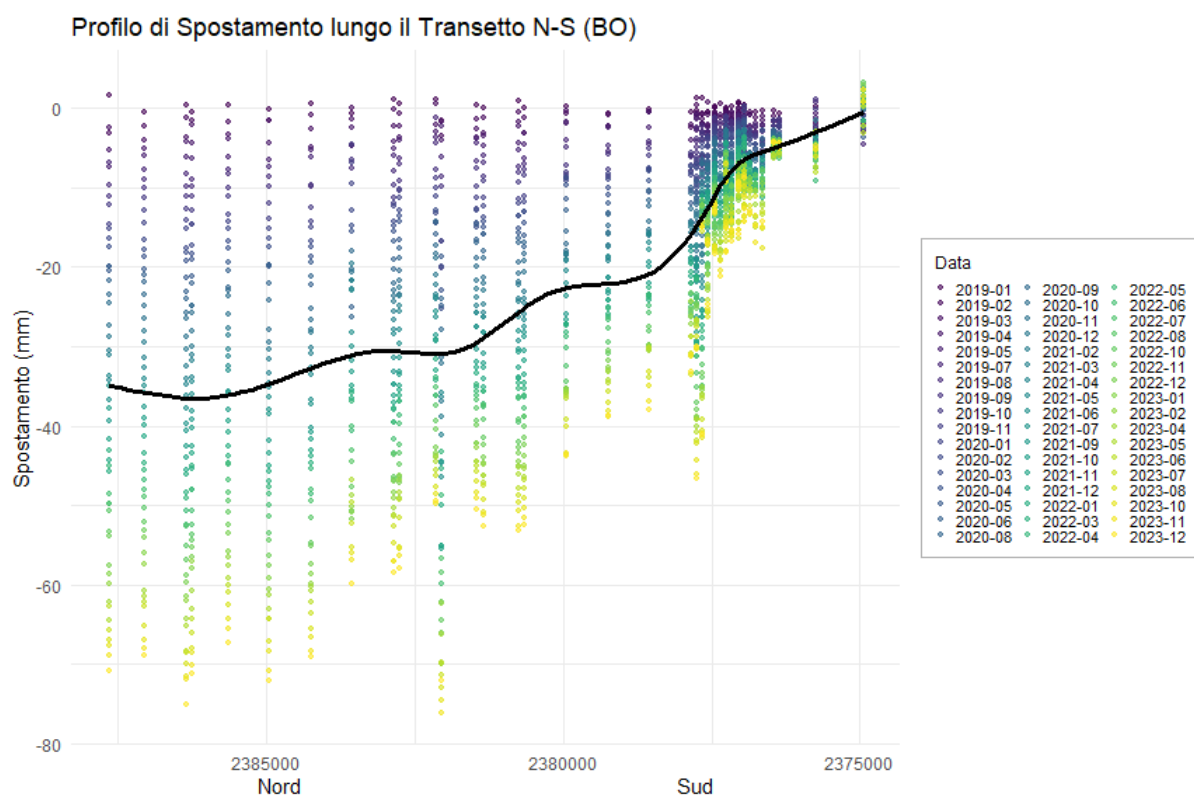


Figura 4.1: Profilo dei valori di subsidenza della zona di Bologna lungo il transetto Nord-Sud.

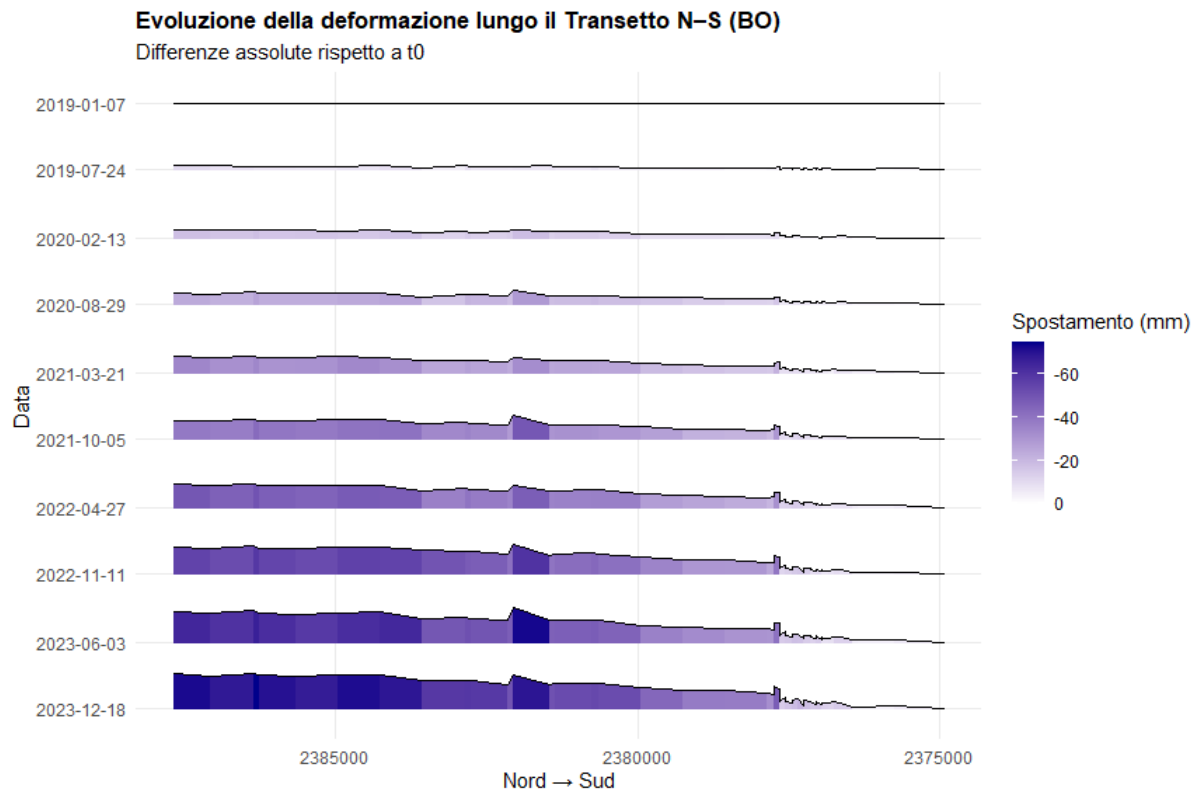


Figura 4.2: Ridge plot filtrato e con gradienti di colore per il transetto Nord-Sud.

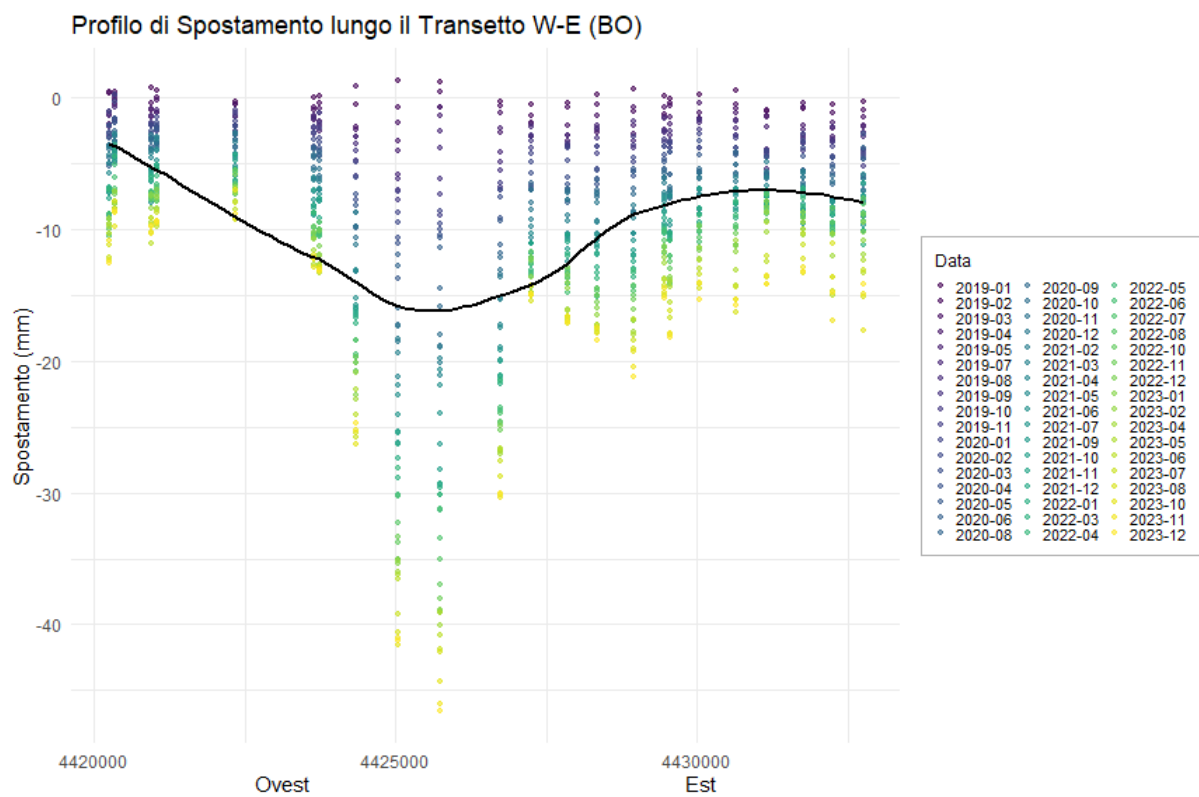


Figura 4.3: Profilo dei valori di subsidenza della zona di Bologna lungo il transetto Ovest-Est.

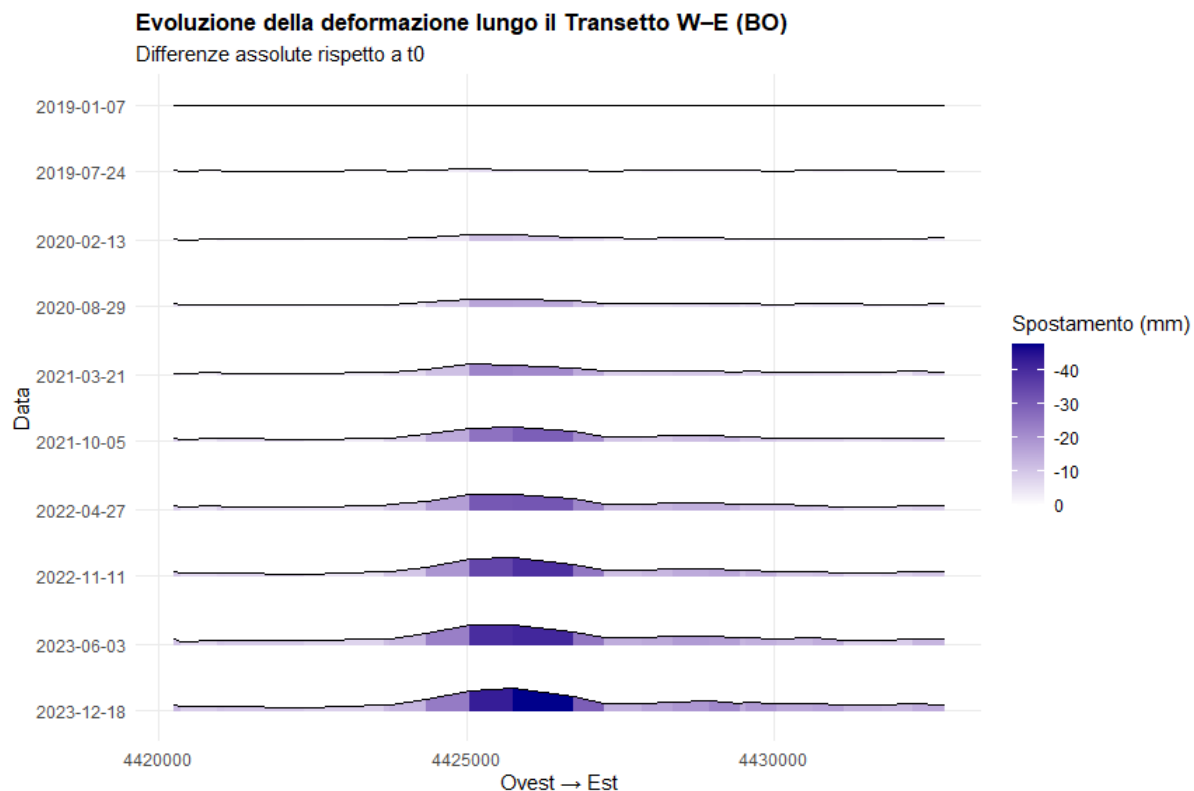


Figura 4.4: Ridge plot filtrato e con gradienti di colore per il transetto Ovest-Est.

4.5 Sintesi critica

In sintesi, l'analisi conferma un comportamento deformativo chiaro e fisicamente interpretabile lungo il transetto Nord-Sud, mentre nel transetto Ovest-Est emergono **inconsistenze significative** nell'area occidentale, che, alla luce dello studio integrativo condotto sull'area di Bologna, possono essere probabilmente attribuite ad artefatti derivanti dall'elaborazione dei dati tramite QGIS sul dispositivo locale.

Il confronto sistematico tra visualizzazioni puntuali (Figura 3.1, Figura 2.5), ridge plot multitemporali (Figura 3.2, Figura 2.7) e ridge plot filtrati con gradienti di colore (Figura 3.3, Figura 2.9) si è dimostrato utile non solo per evidenziare le dinamiche temporali della deformazione, ma anche per identificare eventuali anomalie e limiti nell'interpretazione diretta dei dati, confermando l'importanza di verifiche incrociate su dataset indipendenti per distinguere fenomeni reali da artefatti tecnici.

Capitolo 5

Conclusioni

L'analisi condotta sui transetti Nord-Sud e Ovest-Est ha evidenziato l'efficacia dell'approccio multitemporale nell'interpretazione delle deformazioni del suolo. L'utilizzo di RStudio, con pacchetti come `ggplot2` e `ggribes`, ha permesso di generare grafici a punti, linee di tendenza e ridge plot multitemporali, offrendo una rappresentazione chiara sia dei valori assoluti di spostamento sia dell'evoluzione temporale dei fenomeni deformativi. Tale metodologia si è dimostrata particolarmente utile per distinguere pattern spaziali complessi, individuare sollevamenti e subsidenze, e valutare in maniera quantitativa le variazioni nel tempo.

I risultati ottenuti evidenziano un sollevamento significativo nella porzione meridionale del transetto Nord-Sud, con valori superiori ai 200 mm nell'arco di quattro anni. Questo fenomeno sottolinea l'importanza cruciale del monitoraggio continuo della zona dei Campi Flegrei, in quanto variazioni di tale entità possono avere implicazioni dirette per la gestione del rischio vulcanico e la prevenzione di eventi critici. Il monitoraggio multitemporale, quindi, non rappresenta solo uno metodo di analisi scientifica, ma diventa uno strumento essenziale per la sicurezza e la pianificazione territoriale.

Per quanto riguarda lo sviluppo futuro di questo percorso di ricerca, emergono diverse possibilità di miglioramento: ad esempio, un approccio collaborativo con un team di studio potrebbe garantire una verifica incrociata dei dati e ridurre gli errori derivanti dall'elaborazione locale; l'utilizzo di risorse computazionali dedicate potrebbe velocizzare l'analisi di dataset di grandi dimensioni e consentire una maggiore risoluzione temporale; infine, l'integrazione di dati provenienti da altre fonti satellitari o da misure GPS consentirebbe di rafforzare la validità dei risultati e di correggere eventuali artefatti derivanti dalla gestione dei dati sul singolo dispositivo.

In sintesi, la presente tesi ha dimostrato come l'analisi multitemporale rappresenti uno strumento versatile ed efficace per lo studio delle deformazioni del suolo, sottolineando l'importanza del monitoraggio continuo dei Campi Flegrei e fornendo spunti concreti per migliorare metodologie e risorse nei progetti futuri.

Capitolo 6

Codice RStudio

```
# =====  
# ANALISI MULTITEMPORALE DEI CAMPI FLEGREI  
# =====  
  
# install.packages("readxl")  
# install.packages("ggplot2")  
# install.packages("scales")  
  
library(readxl)  
library(tidyverse)  
library(lubridate)  
library(ggthemes)  
library(dplyr)  
library(ggplot2)  
library(scales)  
  
# Lettura CSV con autodetect separatore  
transettoNS <- read_delim(  
  "C:/.../TransettoNS.csv",  
  delim = NULL,  
  guess_max = 10000,  
  trim_ws = TRUE  
)  
  
# Aggiunge colonna del transetto  
transettoNS <- transettoNS %>%  
  mutate(transetto = "Transetto NS")
```

```

# Colonne statiche
static_cols <- c(
  "pid", "easting", "northing", "height", "rmse",
  "mean_veloc", "mean_vel_1", "accelerati", "accelera_1",
  "seasonalit", "seasonal_1", "transetto"
)

# Pivot long
transettoNS_long <- transettoNS %>%
  pivot_longer(
    cols = -all_of(static_cols),
    names_to = "data",
    values_to = "valore"
  ) %>%
  mutate(data = ymd(data)) %>% # converte le date
  arrange(data)

# # controllo rapido
# print(glimpse(transettoNS_long))
# print(head(transettoNS_long))
#
#
# # controllo che colonna data sia Date
# transettoNS_long$data <- as.Date(transettoNS_long$data)

# selezioniamo solo alcune date (es: una ogni ~6 mesi)
date_selezionate <- transettoNS_long %>%
  distinct(data) %>%
  arrange(data) %>%
  slice(seq(1, n(), by = 6)) %>% pull(data)

transettoNS_filtrato <- transettoNS_long %>%
  filter(data %in% date_selezionate)

# Palette dal verde → rosso
palette_date <- colorRampPalette(c("green", "lightgreen", "yellow",
  "red"))(length(date_selezionate))

```

```

# -----
# TRANSETTO N-S
# -----
# Grafico
ggplot(transettoNS_filtrato, aes(x = northing, y = valore,
  color = as.factor(format(data, "%Y-%m")))) +
  geom_point(alpha = 0.6, size = 1.2) +
  geom_smooth(se = FALSE, color = "black", linewidth = 1.2) +

# Scala di colori manuale
scale_color_manual(values = palette_date, name = "Data") +

scale_x_reverse(name = "Nord - Sud") +

labs(
  title = "Profilo di Spostamento lungo il Transetto N-S",
  y = "Spostamento (mm)"
) +

theme_minimal() +
theme(
  legend.position = "right",
  legend.box = "vertical",
  legend.text = element_text(size = 8),
  legend.title = element_text(size = 9),
  legend.key.width = unit(2, "mm"),
  legend.key.height = unit(2, "mm"),
  legend.spacing.y = unit(0.5, "mm"),
  legend.box.background = element_rect(color = "gray70", fill =
    "white"),
  legend.box.margin = margin(2,2,2,2)
)

# ORA PRENDIAMO IL TRANSETTO WE

# Lettura CSV con autodetect separatore
transettoEW <- read_delim(

```

```
"C:/.../TransettoEW.csv",
delim = NULL,
guess_max = 10000,
trim_ws = TRUE
)

# # Aggiunge colonna del transetto
transettoEW <- transettoEW %>%
  mutate(transetto = "Transetto EW")

# Colonne statiche presenti nel file
static_cols <- c(
  "pid", "easting", "northing", "height", "rmse",
  "mean_velocity", "mean_velocity_std",
  "acceleration", "acceleration_std",
  "seasonality", "seasonality_std",
  "transetto"
)

# Lunghezza pivot
transettoEW_long <- transettoEW %>%
  pivot_longer(
    cols = -all_of(static_cols),
    names_to = "data",
    values_to = "valore"
  ) %>%
  mutate(data = ymd(data)) %>%
  arrange(data)

# # controllo rapido
# print(glimpse(transettoEW_long))
# print(head(transettoEW_long))
#
# # assicuriamo che la colonna data sia Date
# transettoEW_long$data <- as.Date(transettoEW_long$data)

# Selezioniamo solo alcune date (una ogni ~6 mesi)
date_selezionate <- transettoEW_long %>%
```



```

distinct(data) %>%
arrange(data) %>%
slice(seq(1, n(), by = 6)) %>% pull(data)

transettoEW_filtrato <- transettoEW_long %>%
  filter(data %in% date_selezionate)

# Palette dal verde → rosso
palette_date <- colorRampPalette(c("green", "lightgreen", "yellow",
"red"))(length(date_selezionate))

# -----
# TRANSETTO W-E
# -----
# Grafico
ggplot(transettoEW_filtrato, aes(x = easting, y = valore,
  color = as.factor(format(data, "%Y-%m")), group = 1)) +
  geom_point(alpha = 0.6, size = 1.2) +
  geom_smooth(se = FALSE, color = "black", method = "loess") +

  scale_color_manual(values = palette_date, name = "Data") +

# Asse X in ordine crescente
labs(
  title = "Profilo di Spostamento lungo il Transetto W-E",
  x = "Ovest - Est",
  y = "Spostamento (mm)"
) +

theme_minimal() +
theme(
  legend.position = "right",
  legend.box = "vertical",
  legend.text = element_text(size = 8),
  legend.title = element_text(size = 9),
  legend.key.width = unit(2, "mm"),

```

```

    legend.key.height = unit(2, "mm"),
    legend.spacing.y = unit(0.5, "mm"),
    legend.box.background = element_rect(color = "gray70", fill =
                                          "white"),
    legend.box.margin = margin(2,2,2,2)
  )

# -----
# Altro formato di grafici con confronto multitemporale
#-----

# Funzione per preparare i dati con buona distanza verticale
crea_ridge_data <- function(df){
  df <- df %>% arrange(data)

  # Primo valore per differenza
  prima_data <- df %>%
    filter(data == min(data)) %>%
    select(pid, valore) %>%
    rename(valore0 = valore)

  df_diff <- df %>%
    left_join(prima_data, by = "pid") %>%
    mutate(diff = valore - valore0,
           data_factor = factor(format(data, "%Y-%m"),
                                levels = rev(unique(format(data, "%Y-%m")))),
           y_index = as.numeric(data_factor))

  # Moltiplicatore grande per separare molto le curve
  df_diff <- df_diff %>% mutate(y_plot = y_index * 50)

  return(df_diff)
}

# -----

```

```

# Transetto N-S
# -----
transettoNS_plot <- crea_ridge_data(transettoNS_long)

ggplot(transettoNS_plot,
       aes(x = northing,
           y = y_plot,
           height = diff,
           group = data_factor)) +
geom_ridgeline(scale = 1.5, alpha = 0.6, fill = "steelblue",
              color = "black") +
scale_x_reverse() + # <- inverte l'asse X
scale_y_continuous(
  breaks =
    transettoNS_plot$y_plot[!duplicated(transettoNS_plot$y_plot)],
  labels = rev(unique(transettoNS_plot$data_factor))
) +
labs(
  title = "Evoluzione deformazione - Transetto N-S",
  x = "Nord - Sud",
  y = "Data",
  subtitle = "Spostamento relativo rispetto alla prima data (t0 = 0)"
) +
theme_minimal() +
theme(
  axis.text.y = element_text(size = 8),
  plot.title = element_text(face = "bold", size = 12)
)

# -----
# Transetto E-W
# -----
transettoEW_plot <- crea_ridge_data(transettoEW_long)

ggplot(transettoEW_plot,
       aes(x = easting,
           y = y_plot,
           height = diff,

```

```

      group = data_factor)) +
geom_ridgeline(scale = 1.5, alpha = 0.6, fill = "steelblue",
  color = "black") +
scale_y_continuous(
  breaks =
    transettoEW_plot$y_plot[!duplicated(transettoEW_plot$y_plot)],
  labels = rev(unique(transettoEW_plot$data_factor))
) +
labs(
  title = "Evoluzione deformazione - Transetto W-E",
  x = "Ovest - Est",
  y = "Data",
  subtitle =
    "Spostamento relativo rispetto alla prima data (t0 = 0)"
) +
theme_minimal() +
theme(
  axis.text.y = element_text(size = 8),
  plot.title = element_text(face = "bold", size = 12)
)

#-----
# produzione di GRAFICI più LEGGIBILI
#-----

# Funzione per preparare i dati con grande distanza verticale e
# filtraggio delle date
crea_ridge_data_filtrata <- function(df, step = 5){
  df <- df %>% arrange(data)

  # Primo valore per differenza
  prima_data <- df %>%
    filter(data == min(data)) %>%
    select(pid, valore) %>%
    rename(valore0 = valore)

  df_diff <- df %>%

```

```

left_join(prima_data, by = "pid") %>%
mutate(diff = valore - valore0,
       data_factor = factor(format(data, "%Y-%m"),
                             levels = rev(unique(format(data, "%Y-%m")))),
       y_index = as.numeric(data_factor),
       y_plot = y_index * 50)

# Filtra solo le date da mostrare: uno ogni "tot" mesi
show_indices <- seq(1, length(unique(df_diff$data_factor)),
                    by = step)
date_show <- rev(unique(df_diff$data_factor))[show_indices]
df_diff <- df_diff %>% filter(data_factor %in% date_show)

return(df_diff)
}

# -----
# Transetto N-S
# -----
transettoNS_plot <- crea_ridge_data_filtrata(transettoNS_long,
                                             step = 5)

ggplot(transettoNS_plot,
       aes(x = northing,
           y = y_plot,
           height = diff,
           group = data_factor,
           fill = diff)) + # fill varia lungo la curva
geom_ridgeline_gradient(scale = 1.5, alpha = 0.8) +
scale_fill_gradient(low = "lightblue", high = "blue", name =
"Spostamento (mm)") +
scale_y_continuous(
  breaks =
    transettoNS_plot$y_plot[!duplicated(transettoNS_plot$y_plot)],
  labels =
    transettoNS_plot$data_factor[!duplicated(transettoNS_plot$y_plot)]
) +
scale_x_reverse() +

```

```

labs(
  title = "Evoluzione deformazione - Transetto N-S",
  x = "Nord - Sud",
  y = "Data",
  subtitle =
    "Spostamento relativo rispetto alla prima data (t0 = 0)"
) +
theme_minimal() +
theme(
  axis.text.y = element_text(size = 8),
  plot.title = element_text(face = "bold", size = 12),
  legend.position = "right"
)

# -----
# Transetto E-W
# -----
transettoEW_plot <- crea_ridge_data_filtrata(transettoEW_long,
                                             step = 5)

ggplot(transettoEW_plot,
  aes(x = easting,
      y = y_plot,
      height = diff,
      group = data_factor,
      fill = diff)) + # fill varia secondo l'altezza della curva
geom_ridgeline_gradient(scale = 1.5, alpha = 0.8) +
scale_fill_gradientn(
  colors = c("white", "lightblue", "blue"), # basso, medio, alto
  values = scales::rescale(c(min(transettoNS_plot$diff),
                                median(transettoNS_plot$diff),
                                max(transettoNS_plot$diff))),
  name = "Spostamento (mm)"
) + # legenda in mm
scale_y_continuous(
  breaks =
    transettoEW_plot$y_plot[!duplicated(transettoEW_plot$y_plot)],
  labels =

```

```

    transettoEW_plot$data_factor[!duplicated(transettoEW_plot$y_plot)]
  ) +
  labs(
    title = "Evoluzione deformazione - Transetto W-E",
    x = "Ovest - Est",
    y = "Data",
    subtitle = "Spostamento relativo rispetto alla prima data (t0 = 0)"
  ) +
  theme_minimal() +
  theme(
    axis.text.y = element_text(size = 8),
    plot.title = element_text(face = "bold", size = 12),
    legend.position = "right"
  )

# =====
# =====
# =====

# =====
# ANALISI MULTITEMPORALE DELLA SUBSIDENZA DI BOLOGNA
# =====

# =====
# TRANSETTO N-S
# =====

# Lettura CSV
transettoBoNS <- read_delim(
  "C:/.../TransettoBoNS.csv",
  delim = ",",
  guess_max = 10000,
  trim_ws = TRUE
)

# Aggiunge colonna del transetto

```

```

transettoBoNS <- transettoBoNS %>%
  mutate(transetto = "Transetto Bo NS")

# Colonne statiche presenti nel CSV
static_cols <- c(
  "pid", "easting", "northing", "height", "rmse",
  "mean_velocity", "mean_velocity_std",
  "acceleration", "acceleration_std",
  "seasonality", "seasonality_std",
  "transetto"
)

# Pivot long
transettoBoNS_long <- transettoBoNS %>%
  pivot_longer(
    cols = -all_of(static_cols),
    names_to = "data",
    values_to = "valore"
  ) %>%
  mutate(data = ymd(data)) %>%
  arrange(data)

# =====
# TRANSETTO W-E
# =====

# Lettura CSV
transettoBoEW <- read_delim(
  "C:/.../TransettoBoEW.csv",
  delim = ",",
  guess_max = 10000,
  trim_ws = TRUE
)

# Aggiunge colonna del transetto
transettoBoEW <- transettoBoEW %>%
  mutate(transetto = "Transetto Bo EW")

```



```

# Pivot long
transettoBoEW_long <- transettoBoEW %>%
  pivot_longer(
    cols = -all_of(static_cols),
    names_to = "data",
    values_to = "valore"
  ) %>%
  mutate(data = ymd(data)) %>%
  arrange(data)

# =====
# GRAFICI BASE N-S e W-E
# =====

# Selezione date (una ogni ~6 mesi)
date_selezionate_NS <- transettoBoNS_long %>%
  distinct(data) %>%
  arrange(data) %>%
  slice(seq(1, n(), by = 6)) %>%
  pull(data)

transettoBoNS_filtrato <- transettoBoNS_long %>%
  filter(data %in% date_selezionate_NS)

palette_date_NS <- colorRampPalette(c("green", "lightgreen",
"yellow", "red"))(length(date_selezionate_NS))

ggplot(transettoBoNS_filtrato, aes(x = northing, y = valore,
                                color = as.factor(format(data, "%Y-%m")))) +
  geom_point(alpha = 0.6, size = 1.2) +
  geom_smooth(se = FALSE, color = "black", linewidth = 1.2) +
  scale_color_manual(values = palette_date_NS, name = "Data") +
  scale_x_reverse(name = "Nord")
labs(
  title = "Profilo di Spostamento lungo il Transetto N-S (BO)",
  y = "Spostamento (mm)"
) +
theme_minimal() +

```

```

theme(
  legend.position = "right",
  legend.box = "vertical",
  legend.text = element_text(size = 8),
  legend.title = element_text(size = 9),
  legend.key.width = unit(2, "mm"),
  legend.key.height = unit(2, "mm"),
  legend.spacing.y = unit(0.5, "mm"),
  legend.box.background = element_rect(color = "gray70",
                                         fill = "white"),
  legend.box.margin = margin(2,2,2,2)
)

# W-E
date_selezionate_EW <- transettoBoEW_long %>%
  distinct(data) %>%
  arrange(data) %>%
  slice(seq(1, n(), by = 6)) %>%
  pull(data)

transettoBoEW_filtrato <- transettoBoEW_long %>%
  filter(data %in% date_selezionate_EW)

palette_date_EW <- colorRampPalette(c("green", "lightgreen", "yellow",
"red"))(length(date_selezionate_EW))

ggplot(transettoBoEW_filtrato, aes(x = easting, y = valore, color =
as.factor(format(data, "%Y-%m")), group = 1)) +
  geom_point(alpha = 0.6, size = 1.2) +
  geom_smooth(se = FALSE, color = "black", method = "loess") +
  scale_color_manual(values = palette_date_EW, name = "Data") +
  labs(
    title = "Profilo di Spostamento lungo il Transetto W-E (BO)",
    x = "Ovest - Est",
    y = "Spostamento (mm)"
  ) +
  theme_minimal() +
  theme(

```

```

    legend.position = "right",
    legend.box = "vertical",
    legend.text = element_text(size = 8),
    legend.title = element_text(size = 9),
    legend.key.width = unit(2, "mm"),
    legend.key.height = unit(2, "mm"),
    legend.spacing.y = unit(0.5, "mm"),
    legend.box.background = element_rect(color = "gray70",
                                          fill = "white"),
    legend.box.margin = margin(2,2,2,2)
  )

# =====
# FUNZIONE PER RIDGE PLOTS CON SELEZIONE DATE
# =====
crea_ridge_data_filtrata <- function(df, step = 5){
  df <- df %>% arrange(data)

  # Primo valore per differenza
  t0 <- df %>% filter(data == min(data)) %>% select(pid, valore) %>%
    rename(valore0 = valore)

  df_diff <- df %>%
    left_join(t0, by = "pid") %>%
    mutate(
      diff = valore - valore0,
      data_factor = factor(format(data, "%Y-%m"), levels =
        rev(unique(format(data, "%Y-%m")))),
      y_index = as.numeric(data_factor),
      y_plot = y_index * 50
    ) %>%
    drop_na(diff)

  # Selezione date: t0 + una ogni step
  all_dates <- rev(unique(df_diff$data_factor))
  date_show <- c(all_dates[1], all_dates[seq(2, length(all_dates),
    by = step)])
  df_diff <- df_diff %>% filter(data_factor %in% date_show)

```

```

# Rimuove eventuali gruppi con meno di 2 punti
df_diff <- df_diff %>%
  group_by(data_factor) %>%
  filter(n() > 1) %>%
  ungroup()

return(df_diff)
}

# =====
# RIDGE PLOT MULTITEMPORALE - TRANSETTO N-S
# =====

# Aggiunge colonna del transetto
transettoBoNS <- transettoBoNS %>%
  mutate(transetto = "Transetto Bo NS")

# Colonne statiche
static_cols <- c(
  "pid", "easting", "northing", "height", "rmse",
  "mean_velocity", "mean_velocity_std",
  "acceleration", "acceleration_std",
  "seasonality", "seasonality_std",
  "transetto"
)

# =====
# Pivot long
# =====
transettoBoNS_long <- transettoBoNS %>%
  pivot_longer(
    cols = -all_of(static_cols),
    names_to = "data",
    values_to = "valore"
  ) %>%
  mutate(data = ymd(data)) %>%
  arrange(data)

```

```

# =====
# Calcolo differenze da t0 + selezione automatica di 10 date
# =====
crea_ridge_data_filtrata <- function(df) {
  df <- df %>% arrange(data)

  # t0 = prima data
  t0 <- df %>%
    filter(data == min(data)) %>%
    select(pid, valore) %>%
    rename(valore0 = valore)

  # Calcolo differenze rispetto a t0 (valori assoluti)
  df_diff <- df %>%
    left_join(t0, by = "pid") %>%
    mutate(
      diff = abs(valore - valore0),
      data_factor = factor(format(data, "%Y-%m-%d"),
                           levels = rev(unique(format(data, "%Y-%m-%d"))))
    ) %>%
    drop_na(diff)

  # Seleziona massimo 10 date equidistanti nel tempo
  all_dates <- rev(unique(df_diff$data_factor))
  n_dates <- length(all_dates)
  n_show <- 10 # numero massimo di date da mostrare
  show_indices <- unique(round(seq(1, n_dates, length.out = n_show)))
  date_show <- all_dates[show_indices]
  df_diff <- df_diff %>% filter(data_factor %in% date_show)

  # Mantieni solo gruppi con almeno 2 punti
  df_diff <- df_diff %>%
    group_by(data_factor) %>%
    filter(n() > 1) %>%
    ungroup()

  # Distanza verticale maggiore tra le date
  df_diff <- df_diff %>%

```

```

    mutate(
      y_index = as.numeric(data_factor),
      y_plot = y_index * 500 # ampia separazione tra le curve
    )

  return(df_diff)
}

# Applica la funzione
transettoBoNS_ridge <- crea_ridge_data_filtrata(transettoBoNS_long)

# =====
# Ridge Plot
# =====

ggplot(transettoBoNS_ridge,
       aes(x = northing,
           y = y_plot,
           height = diff,
           group = data_factor,
           fill = diff)) +
  geom_ridgeline_gradient(scale = 120, alpha = 0.9, color = "black") +
  scale_fill_gradient(
    low = "white",
    high = "darkblue",
    name = "Spostamento (mm)",
    labels = function(x) -x # trasforma la legenda in negativi
  ) +
  scale_y_continuous(
    breaks = transettoBoNS_ridge$y_plot[!duplicated
                                           (transettoBoNS_ridge$data_factor)],
    labels = transettoBoNS_ridge$data_factor[!duplicated
                                                (transettoBoNS_ridge$data_factor)]
  ) +
  scale_x_reverse(name = "Nord → Sud") +
  labs(
    title="Evoluzione della deformazione lungo il Transetto N-S (B0)",
    subtitle = "Differenze assolute rispetto a t0",
    y = "Data"
  )

```

```

) +
theme_minimal() +
theme(
  axis.text.y = element_text(size = 9),
  plot.title = element_text(face = "bold", size = 13),
  legend.position = "right",
  panel.grid.minor = element_blank()
)

# =====
# RIDGE PLOT MULTITEMPORALE - TRANSETTO W-E
# =====

# Aggiunge colonna del transetto
transettoBoEW <- transettoBoEW %>%
  mutate(transetto = "Transetto Bo EW")

# Colonne statiche
static_cols <- c(
  "pid", "easting", "northing", "height", "rmse",
  "mean_velocity", "mean_velocity_std",
  "acceleration", "acceleration_std",
  "seasonality", "seasonality_std",
  "transetto"
)

# =====
# Pivot long
# =====
transettoBoEW_long <- transettoBoEW %>%
  pivot_longer(
    cols = -all_of(static_cols),
    names_to = "data",
    values_to = "valore"
  ) %>%

```

```

mutate(data = ymd(data)) %>%
  arrange(data)

# =====
# Calcolo differenze da t0 + selezione massimo 10 date
# =====
crea_ridge_data_filtrata <- function(df) {
  df <- df %>% arrange(data)

  # t0 = prima data
  t0 <- df %>%
    filter(data == min(data)) %>%
    select(pid, valore) %>%
    rename(valore0 = valore)

  # Calcolo differenze rispetto a t0 (valori assoluti)
  df_diff <- df %>%
    left_join(t0, by = "pid") %>%
    mutate(
      diff = abs(valore - valore0),
      data_factor = factor(format(data, "%Y-%m-%d"),
                           levels = rev(unique(format(data, "%Y-%m-%d"))))
    ) %>%
    drop_na(diff)

  # Seleziona massimo 10 date equidistanti nel tempo
  all_dates <- rev(unique(df_diff$data_factor))
  n_dates <- length(all_dates)
  n_show <- 10 # numero massimo di date da mostrare
  show_indices <- unique(round(seq(1, n_dates, length.out = n_show)))
  date_show <- all_dates[show_indices]
  df_diff <- df_diff %>% filter(data_factor %in% date_show)

  # Mantieni solo gruppi con almeno 2 punti
  df_diff <- df_diff %>%
    group_by(data_factor) %>%
    filter(n() > 1) %>%
    ungroup()

```



```

# Distanza verticale maggiore tra le date
df_diff <- df_diff %>%
  mutate(
    y_index = as.numeric(data_factor),
    y_plot = y_index * 500 # ampia separazione tra le curve
  )

return(df_diff)
}

# Applica la funzione
transettoBoEW_ridge <- crea_ridge_data_filtrata(transettoBoEW_long)

# =====
# Ridge Plot W-E con asse X invertito
# =====
ggplot(transettoBoEW_ridge,
  aes(x = easting,
      y = y_plot,
      height = diff,
      group = data_factor,
      fill = diff)) +
  geom_ridgeline_gradient(scale = 120, alpha = 0.9, color = "black") +
  scale_fill_gradient(
    low = "white",
    high = "darkblue",
    name = "Spostamento (mm)",
    labels = function(x) -x # trasforma i numeri in negativi
  ) +
  scale_y_continuous(
    breaks = transettoBoEW_ridge$y_plot[!duplicated
      (transettoBoEW_ridge$data_factor)],
    labels = transettoBoEW_ridge$data_factor[!duplicate
      (transettoBoEW_ridge$data_factor)]
  ) +
  scale_x_continuous(name = "Ovest → Est") +
  # asse crescente con titolo aggiornato
  labs(

```

```

    title = "Evoluzione della deformazione lungo il Transetto W-E (B0)",
    subtitle = "Differenze assolute rispetto a t0",
    y = "Data"
  ) +
  theme_minimal() +
  theme(
    axis.text.y = element_text(size = 9),
    plot.title = element_text(face = "bold", size = 13),
    legend.position = "right",
    panel.grid.minor = element_blank()
  )

# =====
# =====
# =====
# GRAFICI VIRIDIS
# =====
# =====
# =====

# profilo spostamento lungo il transetto NS
ggplot(transettoNS_filtrato, aes(x = northing, y = valore, color =
as.factor(format(data, "%Y-%m")))) +
  geom_point(alpha = 0.6, size = 1.2) +
  geom_smooth(se = FALSE, color = "black", linewidth = 1.2) +

# Scala colori viridis
scale_color_viridis_d(option = "viridis", name = "Data") +

scale_x_reverse(name = "Nord

labs(
  title = "Profilo di Spostamento lungo il Transetto N-S",
  y = "Spostamento (mm)"
) +

```

```

theme_minimal() +
theme(
  legend.position = "right",
  legend.box = "vertical",
  legend.text = element_text(size = 8),
  legend.title = element_text(size = 9),
  legend.key.width = unit(2, "mm"),
  legend.key.height = unit(2, "mm"),
  legend.spacing.y = unit(0.5, "mm"),
  legend.box.background = element_rect
    (color = "gray70", fill = "white"),
  legend.box.margin = margin(2,2,2,2)
)

# profilo spostamento lungo il transetto WE
ggplot(transettoEW_filtrato, aes(x = easting, y = valore,
  color = as.factor(format(data, "%Y-%m")), group = 1)) +
  geom_point(alpha = 0.6, size = 1.2) +
  geom_smooth(se = FALSE, color = "black", method = "loess") +

# Scala colori viridis
scale_color_viridis_d(option = "viridis", name = "Data") +

labs(
  title = "Profilo di Spostamento lungo il Transetto W-E",
  x = "Ovest - Est",
  y = "Spostamento (mm)"
) +

theme_minimal() +
theme(
  legend.position = "right",
  legend.box = "vertical",
  legend.text = element_text(size = 8),
  legend.title = element_text(size = 9),
  legend.key.width = unit(2, "mm"),
  legend.key.height = unit(2, "mm"),
  legend.spacing.y = unit(0.5, "mm"),

```

```

    legend.box.background = element_rect
      (color = "gray70", fill = "white"),
    legend.box.margin = margin(2,2,2,2)
  )

# Profilo spostamento lungo il transetto di Bologna NS
ggplot(transettoBoNS_filtrato, aes(x = northing, y = valore, color =
as.factor(format(data, "%Y-%m")))) +
  geom_point(alpha = 0.6, size = 1.2) +
  geom_smooth(se = FALSE, color = "black", linewidth = 1.2) +

# Scala colori viridis
scale_color_viridis_d(option = "viridis", name = "Data") +

scale_x_reverse(name = "Nord

labs(
  title = "Profilo di Spostamento lungo il Transetto N-S (BO)",
  y = "Spostamento (mm)"
) +

theme_minimal() +
theme(
  legend.position = "right",
  legend.box = "vertical",
  legend.text = element_text(size = 8),
  legend.title = element_text(size = 9),
  legend.key.width = unit(2, "mm"),
  legend.key.height = unit(2, "mm"),
  legend.spacing.y = unit(0.5, "mm"),
  legend.box.background = element_rect
    (color = "gray70", fill = "white"),
  legend.box.margin = margin(2,2,2,2)
)

# Profilo spostamento lungo il transetto di Bologna WE
ggplot(transettoBoEW_filtrato, aes(x = easting, y = valore, color =
as.factor(format(data, "%Y-%m")), group = 1)) +

```

```
geom_point(alpha = 0.6, size = 1.2) +  
geom_smooth(se = FALSE, color = "black", method = "loess") +  
  
# Scala colori viridis  
scale_color_viridis_d(option = "viridis", name = "Data") +  
  
labs(  
  title = "Profilo di Spostamento lungo il Transetto W-E (BO)",  
  x = "Ovest - Est",  
  y = "Spostamento (mm)"  
) +  
  
theme_minimal() +  
theme(  
  legend.position = "right",  
  legend.box = "vertical",  
  legend.text = element_text(size = 8),  
  legend.title = element_text(size = 9),  
  legend.key.width = unit(2, "mm"),  
  legend.key.height = unit(2, "mm"),  
  legend.spacing.y = unit(0.5, "mm"),  
  legend.box.background = element_rect  
    (color = "gray70", fill = "white"),  
  legend.box.margin = margin(2,2,2,2)  
)
```

Elenco delle figure

1.1	Immagine satellitare dei Campi Flegrei, situati a nord-ovest di Napoli. Fonte: Google Earth (2025) [6].	2
1.2	Schema geologico semplificato dei Campi Flegrei Modificata da Orsi et al. (1996) [8].	3
2.1	Esempio di immagine radar acquisita dal satellite Sentinel-1 (ESA, 2025) [5].	5
2.2	Esempio di interferogramma InSAR dei Campi Flegrei che mostra variazioni della superficie terrestre (ESA, 2025) [5].	5
2.3	Visualizzazione dei punti EGMS georeferenziati in QGIS, con colorazione in base alla velocità media del terreno. Sono visibili il due transetti: di colorazione rossa il Transetto E-w e di colorazione blu il Transetto N-S. . .	6
2.4	Profilo dei valori di deformazione lungo il transetto Nord-Sud. Ogni punto rappresenta la misura di spostamento verticale del terreno in un determinato punto (<code>pid</code>) e data di acquisizione. Le linee nere mostrano la tendenza generale dei dati tramite <code>geom_smooth</code> . Le diverse colorazioni indicano date differenti, selezionate circa ogni sei mesi, per evidenziare le variazioni nel tempo.	10
2.5	Profilo dei valori di deformazione lungo il transetto Ovest-Est.	10
2.6	Diagramma a densità sovrapposte (ridge plot) del transetto Nord-Sud. Ogni curva rappresenta lo spostamento relativo rispetto alla prima data (t_0), evidenziando sollevamenti o subsidenze nel tempo. L'asse verticale rappresenta le diverse date, mentre l'asse orizzontale indica la posizione lungo il transetto. Le curve sono separate verticalmente per rendere visibili le variazioni tra le diverse date.	12
2.7	Diagramma a densità sovrapposte (ridge plot) del transetto Ovest-Est. . .	13
2.8	Ridge plot filtrato e con gradienti di colore per il transetto Nord-Sud. Il colore delle curve indica l'entità dello spostamento (mm), dal blu chiaro (basso) al blu intenso (alto). Le curve sono state selezionate per mostrare solo date significative, migliorando la leggibilità del grafico.	14
2.9	Ridge plot filtrato e con gradienti di colore per il transetto Ovest-Est. . .	15

3.1	Profilo dei valori di deformazione lungo il transetto Nord-Sud.	17
3.2	Diagramma a densità sovrapposte (ridge plot) del transetto Nord-Sud. . .	17
3.3	Ridge plot filtrato e con gradienti di colore per il transetto Nord-Sud. . . .	18
3.4	Profilo dei valori di deformazione lungo il transetto Ovest-Est diviso in settori: occidentale (arancione) e orientale (viola).	19
3.5	Diagramma a densità sovrapposte (ridge plot) del transetto Ovest-Est. Viene evidenziata la zona di iatus del dato negativo.	19
3.6	Ridge plot filtrato e con gradienti di colore per il transetto Ovest-Est. Viene evidenziata la zona di iatus del dato negativo.	20
4.1	Profilo dei valori di subsidenza della zona di Bologna lungo il transetto Nord-Sud.	23
4.2	Ridge plot filtrato e con gradienti di colore per il transetto Nord-Sud. . . .	24
4.3	Profilo dei valori di subsidenza della zona di Bologna lungo il transetto Ovest-Est.	24
4.4	Ridge plot filtrato e con gradienti di colore per il transetto Ovest-Est. . . .	25

Bibliografia

- [1] L. Civetta et al. The campanian ignimbrite (ci): A large-volume trachytic tuff erupted at 37 ka from the campi flegrei caldera, italy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 79(3-4):271–291, 1997.
- [2] M. Del Monte, T. Ricci, and G. Ventura. Monitoring ground deformation at campi flegrei: Insar applications. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 190:123–136, 2010.
- [3] M. A. Di Vito et al. The 1538 eruption at campi flegrei resurgent caldera. *Bulletin of Volcanology*, 49:1–15, 1987.
- [4] EGMS.
- [5] European Space Agency (ESA). Sentinel-1 Mission Overview, 2025. Consultato il 21 ottobre 2025.
- [6] Google Earth. Google Earth Pro. <https://www.google.com/earth/>, 2025. Immagine satellitare dei Campi Flegrei, data di accesso: 21/10/2025.
- [7] D. Massonnet and K. Feigl. Radar interferometry and its application to changes in the earth’s surface. *Reviews of Geophysics*, 31:137–176, 1993.
- [8] G. Orsi, M. A. Di Vito, L. Lirer, and S. Terracciano. The campi flegrei caldera: an example of active, densely populated and exploited volcano. *American Geophysical Union Monograph*, 1996.
- [9] X. Tan, A. Tramelli, S. Gammaldi, and G. C. Beroza. A clearer view of the current phase of unrest at campi flegrei caldera. *Science*, October 2025.
- [10] K. Wohletz. Eruptive mechanisms of the neapolitan yellow tuff (nyt) eruption, campi flegrei, italy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 66(1-4):1–30, 1995.