

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Civile

Tesi di laurea magistrale

## Analisi delle metodologie e delle tecniche GNSS per il monitoraggio dei fenomeni franosi



**Relatore**  
**prof. Piras Marco**  
*firma del relatore*  
.....

**Correlatore**  
**dr. Giordan Daniele**  
*firma del correlatore*  
.....

**Candidata**  
**Iacob Ecaterina Geanina**  
*firma del candidato*

**A.A. 2018-2019**

## **Ringraziamenti**

*Ringrazio il professore Marco Piras, per il suo contributo che ha dato per far nascere la mia tesi di laurea, mettendomi a disposizione le sue vaste competenze in geomatica. Inoltre ringrazio il dr. Daniele Giordan – CNR – IRPI, per avermi fornito tutti i dati a sua disposizione necessari nella stesura della tesi. Ringrazio a tutte e due per la prontezza e per la disponibilità mostratami in ogni occasione in cui ho avuto bisogno della loro gentilissima collaborazione.*

# INDICE

<b>Introduzione</b> .....	5
<b>CAPITOLO 1</b> .....	<b>8</b>
<b>Definizione e classificazione delle frane</b> .....	<b>8</b>
1.1 Definizione di un fenomeno franoso .....	8
1.2 Fattori e cause dei fenomeni franosi .....	8
1.3 Classificazione dei fenomeni franosi .....	10
1.4 Stato di attività di un fenomeno franoso .....	18
<b>CAPITOLO 2</b> .....	<b>19</b>
<b>Sistemi di monitoraggio di un fenomeno franoso</b> .....	<b>19</b>
2.1 I rilievi topografici .....	19
2.2 Strumentazione geotecnica .....	21
2.3 Il SAR (Synthetic Aperture Radar) .....	25
2.4 Il WSN ( <i>Wireless Sensor Network</i> ) .....	26
2.5 LiDAR .....	26
2.6 Fotogrammetria .....	27
2.7 Sistemi aeromobili a pilotaggio remoto (SAPR) .....	29
<b>CAPITOLO 3</b> .....	<b>30</b>
<b>Il sistema GNSS</b> .....	<b>30</b>
3.1 Struttura dei sistemi GNSS .....	31
3.1.1 Il sistema GPS .....	32
3.1.2 Il sistema GLONASS .....	35
3.1.3 Il sistema Galileo .....	36
3.1.4 Il sistema BeiDou .....	37
3.1.5 Il sistema QZSS .....	38
3.2 Errori nelle misure GNSS .....	39
3.3 I formati dei dati GNSS .....	41
3.4 Metodologie del posizionamento GNSS .....	43

3.4.1 Il posizionamento assoluto .....	43
3.4.2 Il posizionamento relativo.....	44
3.4.3 Il posizionamento differenziale.....	50
<b>Capitolo 4 .....</b>	<b>56</b>
<b>Caso studio.....</b>	<b>56</b>
4.1 Descrizione geografica e fisica della frana di Montaguto .....	56
4.2 Serie storiche del monitoraggio della frana di Montaguto.....	58
4.2.1 Analisi dei dati storici .....	59
4.2.2 Monitoraggio a breve termine.....	60
4.3 Analisi dei dati di monitoraggio .....	61
4.3.1. Presentazione generale della rete di monitoraggio della frana di Montaguto....	61
4.3.2 Trattamento dei dati forniti .....	63
<b>CAPITOLO 5 .....</b>	<b>72</b>
<b>Analisi dei sistemi GNSS per il monitoraggio dei versanti in frana.....</b>	<b>72</b>
5.1 Impostazioni degli esperimenti da eseguire .....	72
5.2 Scelta della strumentazione utilizzata e software utilizzati.....	74
5.2.1 Strumentazione utilizzata.....	74
5.2.1.1 U-blox .....	75
5.2.1.2 Leica GX1230 GG .....	76
5.2.1.3 Slitta micrometrica.....	77
5.2.2 Software utilizzati.....	78
5.2.2.1 TEQC.....	79
5.2.2.2 LGO.....	81
5.2.2.3 RTK lib 2.4.2.....	83
<b>CAPITOLO 6.....</b>	<b>85</b>
<b>Analisi dei risultati .....</b>	<b>85</b>
6.1 Trattamento dei dati in modalità statica .....	86
6.1.1 Spostamenti in planimetria.....	87
6.1.2 Spostamenti in altimetria.....	96
6.2 Trattamento dei dati in modalità cinematica .....	104
6.2.1. Spostamenti appartenenti alla categoria “rapid” come classe di velocità, secondo Varnes – prova 1 .....	104
6.2.2 Spostamenti appartenenti alla categoria tra “rapid” e “moderate” come classe di velocità, secondo Varnes – prova 2 .....	107

6.2.3 Spostamenti appartenenti alla categoria “moderate” come classe di velocità, secondo Varnes – prova 3 .....	110
6.2.4 Spostamenti appartenenti alla categoria “slow” come classe di velocità, secondo Varnes – prova 4 e prova 5 .....	113
6.3 Trattamento dei dati in modalità cinematica con RTK-lib .....	118
6.3.1 Spostamenti appartenenti alla categoria “rapid” come classe di velocità, secondo Varnes – prova 1 .....	119
6.3.2 Spostamenti appartenenti tra la categoria “rapid” e “moderate” come classe di velocità, secondo Varnes – prova 2 .....	134
6.3.3 Spostamenti appartenenti alla categoria “moderate” come classe di velocità, secondo Varnes –prova 3.....	149
6.3.4 Spostamenti appartenenti alla categoria “slow” come classe di velocità, secondo Varnes – prove 4 e 5.....	164
6.4 Confronto tra i risultati ottenuti con i software LGO e RTK lib per il trattamento dei dati in modalità cinematica.....	167
<b>Conclusioni</b> .....	169
<b>Appendice</b> .....	172
<b>Trattamento dei dati – Frana di Montaguto</b> .....	172
1 I risultati del calcolo per il prisma 4 <sub>B</sub> .....	172
2 I risultati del calcolo per il prisma 8 <sub>B</sub> .....	177
3 I risultati del calcolo per il prisma 13 <sub>B</sub> .....	181
<b>Bibliografia e sitografia</b> .....	186

# Introduzione

“L’Italia è uno dei paesi europei maggiormente interessati dai fenomeni franosi. Ogni anno oltre un migliaio di frane colpiscono il territorio nazionale, causando vittime e notevoli danni a centri abitati e ad infrastrutture di comunicazione” [1].

Secondo quanto riportato nel bilancio dell’ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), sono state rilevate ad oggi 620.808 frane che interessano un’area di 23.700km<sup>2</sup>, pari al 7,9% del territorio nazionale. La popolazione esposta ai fenomeni franosi ammonta a 1.001.174 abitanti. Oltre alla popolazione esposta, ISPRA ha stimato 6.180 punti di criticità per eventi franosi lungo la rete stradale principale (autostrade, superstrade, strade statali, tangenziali e raccordi), di cui 720 lungo la rete autostradale. Inoltre, 1.862 punti di criticità per frana sono stati individuati lungo i 16.000 km di rete ferroviaria. I dati sono aggiornati in tempi diversi, che vanno dal 2007 al 2017. [1]

In Figura 1, sono presentate le aree che sono a rischio di eventi franosi sul territorio italiano.

Il monitoraggio strumentale di questi fenomeni risulta spesso essere complesso e richiede una collaborazione interdisciplinare. Solitamente viene effettuato con diversi strumenti e tecniche tra i quali: rilievi topografici, stazioni meteo fisse, strumentazione geodetica, il SAR (Synthetic Aperture Radar), il WSN (Wireless Sensor Network), il TLS (Terrestrial Laser Scanner), la fotogrammetria e l’utilizzo dei sistemi GNSS.

L’oggetto di questa tesi è studiare l’impiego delle tecniche GNSS per il monitoraggio dei fenomeni franosi, definendo una strategia di lavoro in base alla tipologia di frana e in base al tipo di approccio usato, considerando anche un monitoraggio continuo.

La tesi si avvale di esperienze di laboratorio, finalizzate all’analisi delle prestazioni della strumentazione GNSS con l’ausilio di una slitta micrometrica. La sperimentazione è stata svolta utilizzando diversi ricevitori e diverse antenne, con precisioni e costi differenti e con sessioni di misura diverse, simulando diversi scenari tratti da un caso reale e basati su veri dati di monitoraggio di una frana. In particolare, grazie alla collaborazione con il CNR-IRPI di

Torino (dr. Giordan), si è potuto accedere ai dati di monitoraggio frana di Montaguto ubicata in Campania, al fine di estrarre i campi di velocità.

Questa frana è monitorata dal 2010, con diverse tecniche che verranno descritte nel capitolo “Caso Studio” tra cui stazioni totali monitorizzate e prismi su punti di monitoraggio.

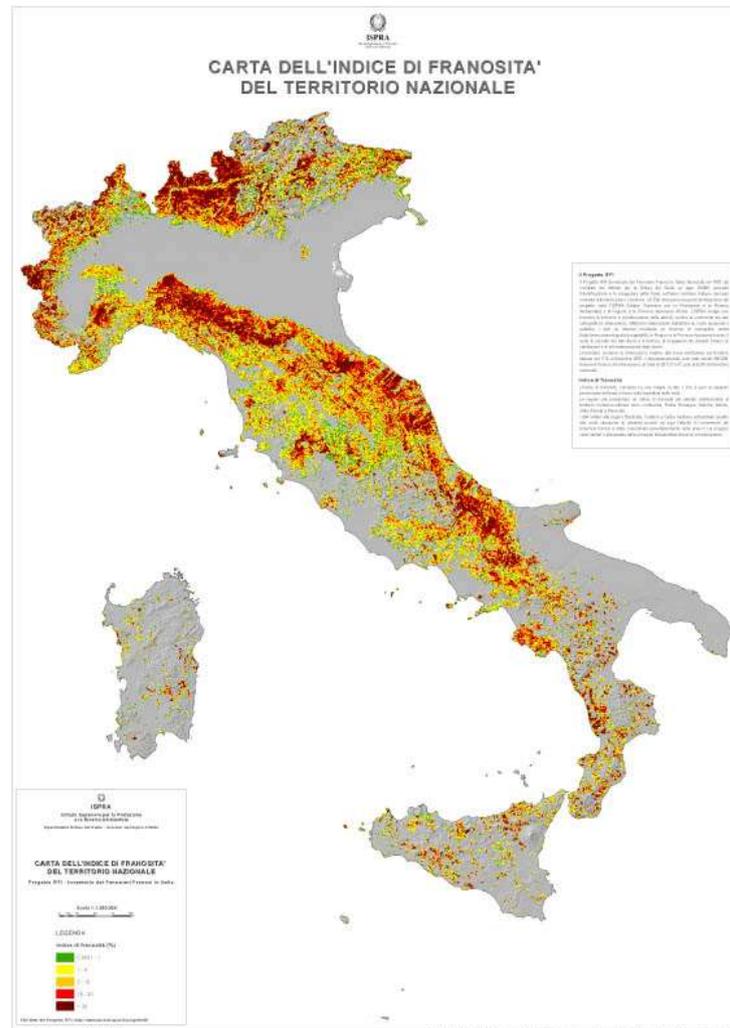


Figura 1 - Carta dell'indice di franosità del territorio italiano [2]

Gli obiettivi del presente lavoro sono:

- analizzare i dati forniti dal CNR-IRPI per la frana di Montaguto. Per raggiungere questo obiettivo, con la collaborazione del Dr. Daniele Giordan, sono stati analizzati dei file messi a disposizione contenenti i dati del monitoraggio della frana di Montaguto e sono stati estratti i valori relativi agli spostamenti e alle velocità, su base mensile, in un determinato periodo temporale. Per una serie di prismi, sono stati calcolati gli spostamenti nelle tre direzioni, 2 planimetriche ed una altimetrica, e le velocità istantanee per poi essere raggruppate in classi di velocità, seguendo la classificazione di Varnes (1978);

- definire gli esperimenti da eseguire in base agli spostamenti e alle velocità istantanee calcolate precedentemente. In base alle classi di velocità trovate nella frana di Montaguto, sono stati eseguiti degli esperimenti/prove per ognuna di esse, sia in planimetria che in altimetria, con ricevitori e antenne a doppia, singola frequenza e a basso costo;
- valutare la precisione spaziale dei vari sistemi di acquisizione dati, con diversi tipi di ricevitori e diverse antenne GNSS e per i vari tipi di posizionamento;
- creare una matrice di correlazione tra spostamento e tipologie di tecnica GNSS utilizzata.

Per raggiungere quest'obiettivo, si è sviluppata una strategia di lavoro con l'impiego di vari ricevitori e antenne e, per la fase di processamento dati, sono state utilizzate diverse tecniche e diversi software, nell'ottica di fornire un quadro ampio e complesso sulla precisione che si può ottenere con i diversi strumenti e con le diverse tecniche di posizionamento. Dato che un fenomeno franoso, specialmente quello multidirezionale, e complesso, può trasformarsi molto facilmente e velocemente in un crollo vero e proprio, risulta necessario che nello studio di questi strumenti entrino anche quelli a basso costo, essendo pericolo di danneggiamento di essi, a volte irreversibile.

Per ogni classe di velocità di spostamento, calcolate dai file di monitoraggio forniti da CNR per la frana di Montaguto, sono stati fatti degli esperimenti/prove, sia in planimetria che in altimetria, il trattamento dei dati effettuandosi sia in maniera statica che in maniera dinamica usando diversi software.

In primo luogo sarà presentata una descrizione dei sistemi di monitoraggio delle frane, con un'attenzione particolare ai concetti fondamentali del posizionamento del GNSS e con un riferimento dettagliato al posizionamento relativo.

Seguirà una descrizione del caso studio, ovvero la frana di Montaguto. Sarà fatto un cenno per quanto riguarda la definizione e la classificazione delle frane.

Si prosegue con una dettagliata descrizione delle metodologie, strumenti e software utilizzati negli esperimenti/prove, dove, in particolar modo, si spiegheranno le diverse combinazioni di ricevitori-antenne impiegate e i diversi approcci per il processamento dati.

Infine si mostreranno i risultati ottenuti, dove verranno stabilite le precisioni raggiunte considerando:

- tipo di spostamento effettuato;
- classe di velocità;
- combinazione ricevitore-antenna;
- tecnica di posizionamento.

Per il posizionamento cinematico il processamento dati sarà fatto con diversi software e verrà presentato un confronto fra i risultati ottenuti con ognuno di essi.

In base alle precisioni raggiunte, per ogni classe di velocità, si potrà stabilire la possibilità di impiego o meno dei ricevitori, delle antenne e delle tecniche di posizionamento e processamento dati, utilizzati nella presente tesi.

# CAPITOLO 1

## Definizione e classificazione delle frane

### 1.1 Definizione di un fenomeno franoso

I fenomeni franosi costituiscono un problema estremamente attuale; secondo Varnes (1958) una frana può essere definita come un “movimento verso il basso e verso l’esterno di materiali (rocce e terreni naturali, materiali di riporto, o combinazioni di più materiali) formanti un pendio” [3].

Il materiale che costituisce un pendio, una parete rocciosa o una scarpata, per effetto della forza di gravità, è attirato verso il basso, rimanendo in tale posizione di equilibrio per effetto delle resistenze interne che lo trattengono. Tale equilibrio di forze dipende da diversi fattori, come: il profilo del pendio, tipo di terreno o di roccia, grado di saturazione del terreno, (cioè la percentuale di acqua contenuta nel terreno), l’innalzamento o l’abbassamento della falda.

La frana inizia a manifestarsi quando, lungo una fascia di terreno solitamente assimilabile ad una superficie presente all’interno del pendio, le tensioni tangenziali eguagliano la resistenza al taglio del terreno.

### 1.2 Fattori e cause dei fenomeni franosi

“I movimenti franosi si verificano in una determinata area, per effetto della concomitanza di diversi fattori sfavorevoli alla stabilità di un versante.

I fattori che generano una frana sono numerosi e riguardano diversi aspetti (naturali, antropici, geologici ecc.); alcuni di essi risultano caratteristici di un versante e rimangono

invariati nel corso del tempo; altri invece devono essere soggetti a controlli periodici o ancor meglio in continuo per la loro rapida variabilità”. [4]

Alla prima categoria appartengono:

- fattori geologici - il tipo di roccia presente, sia in superficie che in profondità;
- fattori morfologici - il movimento di una frana avviene per la forza di gravità, quindi più grandi sono le pendenze del versante tanto maggiore sarà il rischio di frana e tanto maggiore sarà la velocità con la quale un evento franoso si possa verificare;
- fattori idrogeologici – la permeabilità del terreno condiziona la circolazione idrica in superficie ed in profondità. Questi sono dei fattori importanti in quanto la circolazione idrica determina la distribuzione delle pressioni neutre, che possono essere causa dei fenomeni franosi;
- fattori strutturali – Una debolezza del versante può essere costituita dalla presenza di fratture, faglie o superfici di stratificazione;
- fattori geotecnici – rappresentano le resistenze alle sollecitazioni di taglio dei materiali presenti nell’area instabile. Possono essere misurati in laboratorio attraverso indagini accurate e specifiche per ogni tipo di terreno.

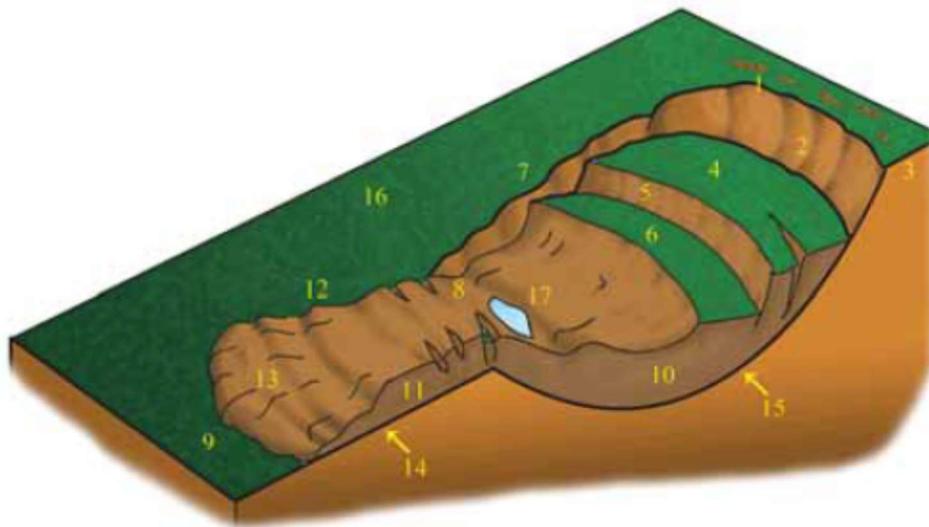
Alla seconda categoria di fattori appartengono:

- “fattori climatici e vegetazionali, il clima di un determinato territorio svolge un ruolo importante nell’insorgere di un fenomeno franoso, specialmente con l’alternanza di lunghe stagioni di siccità a periodi con prolungata piovosità, che modifica la capacità del terreno di avere un’azione drenante superficiale, provocando l’incremento delle azioni erosive e innalzamento delle falde acquifere. Per quanto riguarda la vegetazione, essa svolge un ruolo importante in quanto può costituire un ostacolo all’azione degli agenti atmosferici in grado di limitare l’azione di ruscellamento superficiale ed aumentare la stabilità dei depositi superficiali.
- fattori antropici, ovvero legati all’azione dell’uomo. Talvolta l’uomo impone interventi in tempi brevi, alterando la condizione di naturale stabilità del terreno. Questi interventi possono essere: gli scavi, la creazione di accumuli di terre o rocce da scavo in aree instabili che aumentano il carico sul versante, l’abbandono dei terreni e la riduzione della manutenzione di aree potenzialmente instabili, il disboscamento dei versanti. Tutte queste azioni producono un’alterazione delle condizioni di stabilità del terreno, situazione favorevole per l’insorgere dei fenomeni franosi.” [4]

I fattori che possono generare una frana, possono essere:

- Incremento degli sforzi tangenziali (di taglio), che possono essere causati da diversi fattori, quali: sollecitazioni sismiche, aumenti di carico sul versante (dovuti a costruzioni di rilevati stradali, grandi opere in genere), aumento del peso specifico apparente del terreno (a seguito dell’aumento del contenuto d’acqua), interventi antropici alla base dei versanti.
- Decremento della resistenza al taglio, “che può invece dipendere da: una diminuzione della coesione tra le particelle (in seguito a fenomeni alterativi di tipo fisico, chimico o biologico), il rammollimento del materiale (per presenza d’acqua), l’aumento delle pressioni neutre (per eventi meteorici o per particolari condizioni idrauliche al contorno, che determinano una diminuzione delle pressioni effettive e, quindi, della resistenza al taglio), o con l’insorgenza di sollecitazioni di natura sismica”. [4]

Dal punto di vista morfologico, in un fenomeno franoso è possibile riconoscere i seguenti elementi:



#### NOMENCLATURA

- |  |   |
|--|---|
| 1) Coronamento                               | 10) Corpo principale                            |
| 2) Scarpata principale o nicchia di distacco | 11) Piede                                       |
| 3) Fessure di trazione                       | 12) Rigonfiamenti trasversali                   |
| 4) Testata                                   | 13) Fessure longitudinali o radiali             |
| 5) Scarpata secondaria                       | 14) Superficie di separazione o di scorrimento  |
| 6) Gradino di frana                          | 15) Superficie di rottura o di scivolamento     |
| 7) Fianco destro                             | 16) Superficie originaria del versante          |
| 8) Fessure trasversali                       | 17) Area in contropendenza con ristagni d'acqua |
| 9) Unghia della frana                        |   |

Figura 2- Nomenclatura delle parti di un movimento franoso [5]

In generale, come illustrato nella Figura 2, in un fenomeno franoso si riconoscono i seguenti elementi:

- Zona di distacco – è la zona più alta della frana. Ha una forma a cucchiaio e in questa zona si produce la rottura del versante;
- Alveo o pendio di frana – è la parte mediana della superficie di movimento della frana, dove si ha lo scorrimento della massa in movimento;
- Zona di accumulo – è la parte del piede della frana dove avviene l'accumulo del materiale mobilizzato.

### 1.3 Classificazione dei fenomeni franosi

La classifica che si utilizza in gran parte degli studi è quella introdotta da Varnes, che dà la seguente definizione: "movimento controllato dalla gravità, superficiale o profondo,

rapido o lento, in roccia (bedrock) o in terra (engineering soils)". Varnes classifica i fenomeni franosi nelle seguenti classi fondamentali:

Crolli (falls) - "sono caratterizzati dallo spostamento dei materiali in caduta libera" [6], ad una velocità elevata, con un accumulo di materiale al piede della scarpata. I crolli si verificano sui pendii molto ripidi. Questi fenomeni sono tipici per le rocce lapidee, però si possono verificare anche sui terreni. In genere, queste frane hanno pochi segni premonitori, tra cui: cedimenti nelle zone limitrofe al bordo del pendio e piccole fessure.

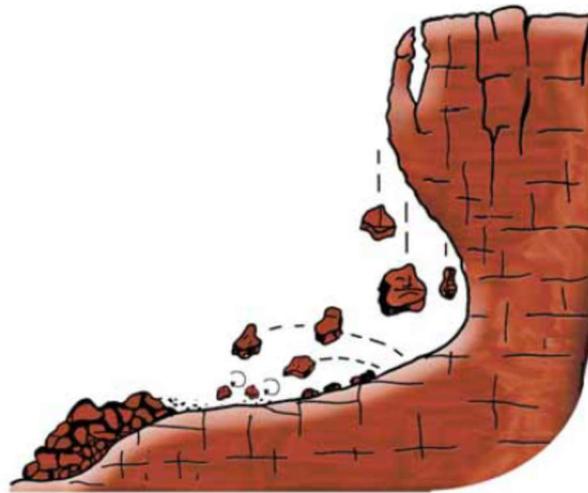


Figura 3 - Modello schematico di un crollo [5]

Ribaltamenti (topples) – "caratterizzati dal ribaltamento frontale del materiale, che ruota intorno ad un punto, sotto l'azione della gravità, quando il rapporto fra base ed altezza del blocco interessato nel ribaltamento risulta essere minore della pendenza del versante. I materiali interessati sono delle rocce lapidee, che hanno subito un intenso processo di alterazione e/o presentano delle superfici di discontinuità (faglie o superfici di stato)" [4]. I ribaltamenti sono spesso associati a crolli e scorrimenti.

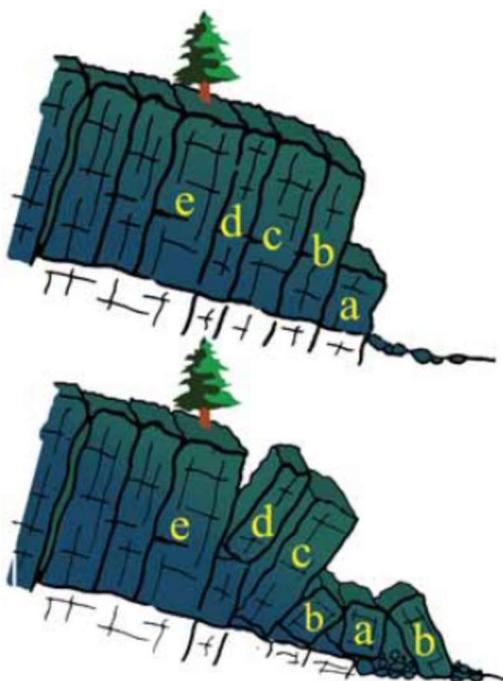


Figura 4 - Modello schematico di un ribaltamento [5]

Scorrimenti o scivolamenti – questi si verificano per il superamento della resistenza al taglio del materiale costituente un pendio. Gli scorrimenti possono essere di tipo rotazionale (slump), che avvengono di solito in una superficie concava, e di tipo traslazionale (slide), che avvengono in una superficie generalmente piana. Allo stesso tempo, quando il movimento del terreno indica la presenza di stati o discontinuità con un'orientazione simile al pendio, e con un'inclinazione che può essere più bassa o più alta del pendio, si tratta di una franapoggio, invece se si verifica la condizione contraria si tratta di una disposizione detta reggipoggio.

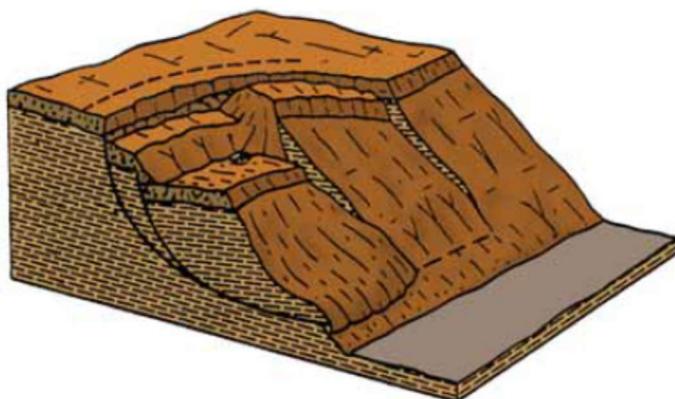
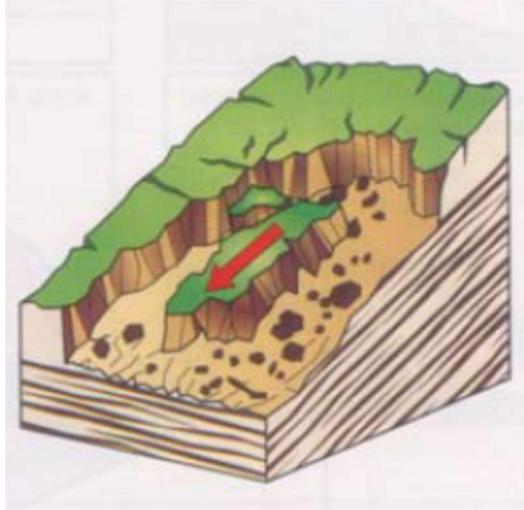


Figura 5 - Modello schematico di uno scorrimento rotazionale [5]



*Figura 6- Modello schematico di frana a scorrimento - scivolamento traslazionale (slide) [7]*

Espansioni laterali (lateral spreads) – “esse si innescano prevalentemente quando una massa dal comportamento “rigido”, che può essere roccia o terra parzialmente cementata, è sovrapposta ad una roccia dal comportamento molto plastico, che, con il susseguirsi delle piogge, ne provoca ed influenza il movimento” [4]. Con l’estensione si verifica una fratturazione del materiale rigido, che può avere anche il carattere di espansione a blocchi. L’espansione può avere anche il carattere di liquefazione, quando si verifica in terreni argillosi.

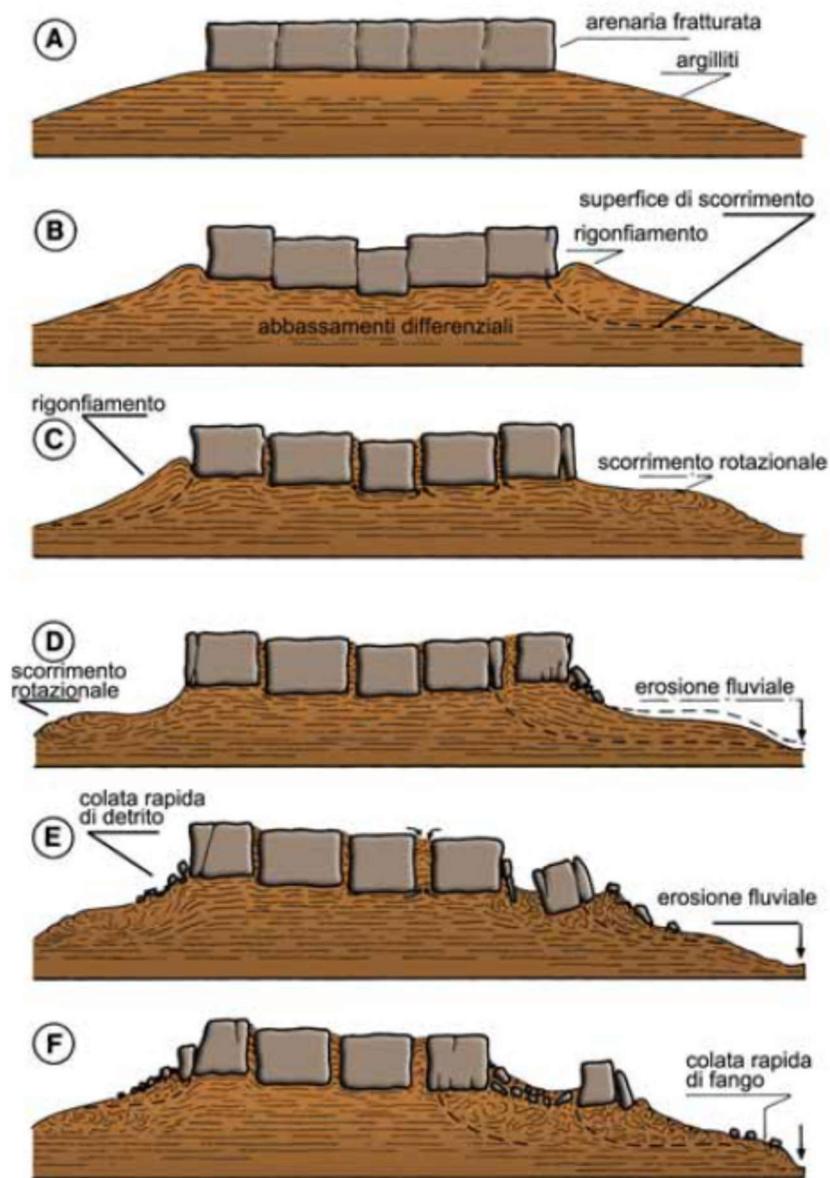


Figura 7- Modelli schematici dell'evoluzione di un'espansione laterale [5]

Colamenti (flows) – sono dei fenomeni che dipendono dalla pendenza del versante, avendo velocità superiori in corrispondenza a pendenze più elevate. Possono essere delle colate, a volte con una velocità elevata, nei terreni saturi o con una composizione molto fine dal punto di vista della granulosità. “I terreni interessati da questo tipo di frana sono: le zone alterate degli ammassi rocciosi, le coperture eluviali, i sedimenti a prevalente componente arenacea, sabbiosa, argillosa e/o limosa, gli accumuli di precedenti frane” [4].



*Figura 8 - Colate rapide di detrito nell'abitato di Fenis durante l'alluvione dell'ottobre 2000, Valle D'Aosta [5]*

Frane complesse (complex) – “fenomeni complessi il cui movimento risulta dalla combinazione spaziale e temporale di due o più tipi di frane precedentemente descritte. Oltre a queste, che possiamo definire frane in senso stretto, esistono altri movimenti di versante che hanno come agente di trasporto principale la gravità, ma che si manifestano con modalità diverse da quelle di una frana. La loro caratteristica principale consiste nel fatto che riguardano la sola coltre detritica di un versante, ossia il mantello di copertura, costituito da terreni sciolti o semisciolti, prodotti dall’alterazione degli ammassi rocciosi. Si distinguono in: colate di detrito, ovvero flussi di terra, detriti rocciosi o fango misti d’acqua, che si comportano nel loro movimento come liquidi viscosi (debris flows). Spesso si sviluppano lungo gli alvei dei torrenti di montagna, durante piene che rendono mobili i sedimenti depositi lungo il corso d’acqua. Un tipo particolare di colata è un flusso di fango, generato dalla saturazione in acqua delle ceneri e dei lapidei, che si depositano sul fianco di un vulcano” [4].

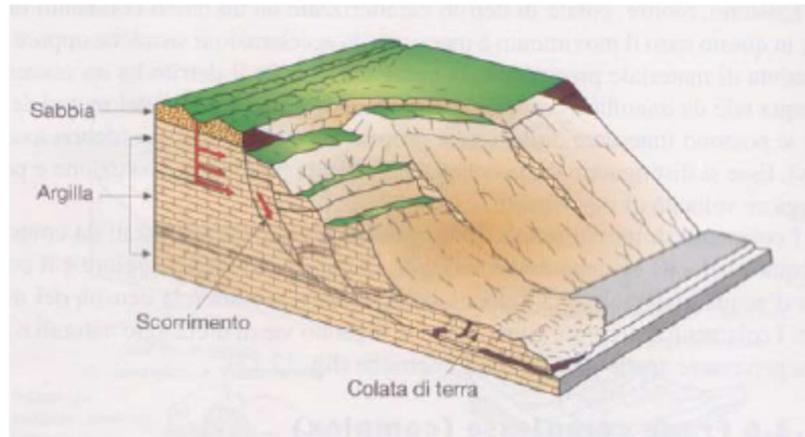


Figura 9 - Modello schematico di un movimento franoso complesso [7]

Movimenti lenti superficiali – della coltre detritica. Questi fenomeni possono essere di due categorie:

- il *soliflusso* (mostrato in Figura 10) - che hanno una velocità che varia dal millimetro al metro all'anno. Sono dei movimenti verso la porzione basale del versante;
- il *soil-creep* (mostrato in Figura 11) - "che consiste nel lento fluire della coltre detritica, per effetto di tutti quei fattori che producono piccoli spostamenti nelle sue particelle come: le contrazioni e dilatazioni termiche, la formazione di scioglimento di ghiaccio o il passaggio di animali. La maggior parte di questi spostamenti, per effetto della forza di gravità, si traduce in movimenti lungo la linea di massima pendenza; la somma di queste deformazioni produce uno scorrimento complessivo della coltre detritica che può raggiungere una velocità di qualche millimetro all'anno" [4];
- quando la superficie coinvolta nel fenomeno franoso risulta essere saturata di acque d'infiltrazione e priva di copertura superficiale, si può avere il soil-slip. Questo fenomeno può coinvolgere anche le porzioni alterate del bedrock al di sotto dei depositi superficiali.

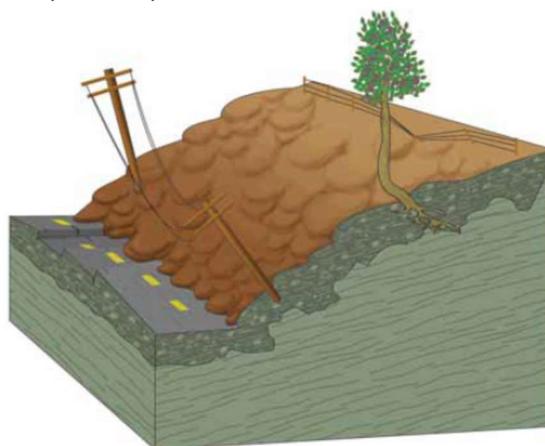
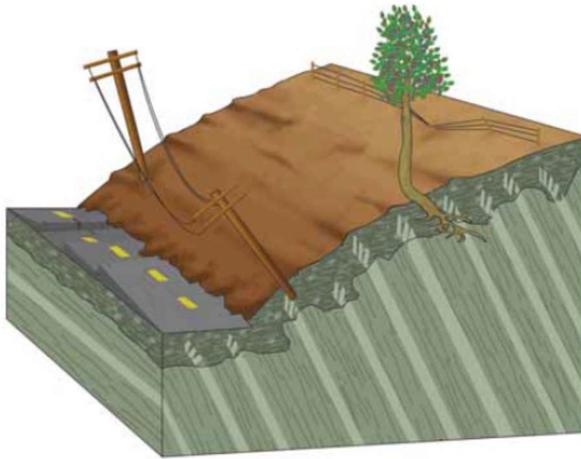
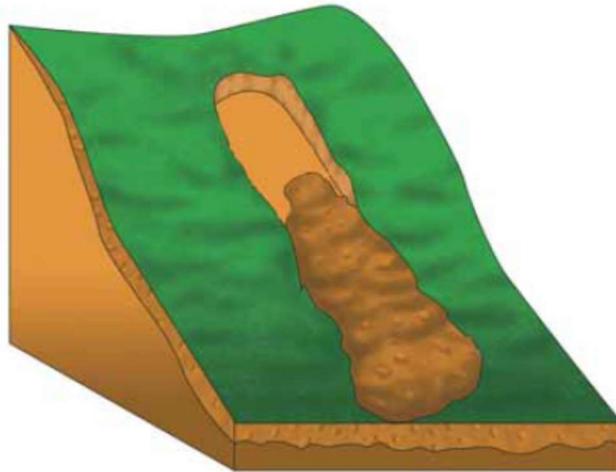


Figura 10 - Modello schematico di un soliflusso [5]



*Figura 11 - Modello schematico di movimenti lenti superficiali (soil creep) [5]*



*Figura 12 - Modello schematico di soil slip [5]*

Fenomeni di erosione accelerata dei versanti – sono dei fenomeni tipici dei versanti argillosi che si manifestano come un'erosione accelerata dovuta al dilavamento da parte delle acque superficiali.



*Figura 13 - Erosione accelerata dei versanti - località Riserva Naturale di Calanchi di Atri (PE) [8]*

## 1.4 Stato di attività di un fenomeno franoso

Nello studio di un fenomeno di instabilità è fondamentale non solo l'individuazione della tipologia del fenomeno ma anche del suo stato di attività. Nella Tabella 1 sono presentati la valutazione dello stato, dello stile e della distribuzione dell'attività del movimento, che sono aspetti altrettanto fondamentali.

<b>Stato</b>	Stabilizzato	Il versante non è più in movimento e le condizioni morfologiche e climatiche che hanno determinato in passato un fenomeno di instabilità non sono più presenti. Può essere naturalmente o artificialmente stabilizzato.
	Relitto	Quando non sono più presenti le condizioni geomorfologiche o climatiche per innescare un movimento franoso.
	Quiescente	In un versante non attivo da più di un anno che presenta ancora le condizioni per una sua riattivazione.
	Attivo	In un versante sono presenti movimenti con diverse velocità, con o senza continuità nel tempo.
<b>Stile</b>	Singolo	Quando si coinvolge nel movimento del terreno un'unica tipologia di frana.
	Complesso	Quando si coinvolge una parte o per intero, di un versante, con movimenti appartenenti a più categorie, anche senza continuità temporale.
	Composito	Quando si può distinguere un fenomeno franoso, che si manifesta in fasi temporali successive con il coinvolgimento di più tipologie di movimento.
	Successivo	Una parte del versante che presenta tempi di attività e inattività.
	Multiplo	Quando un versante o una parte di esso, in passato è stato coinvolto nel dislocamento delle masse, inizia a presentare dei nuovi movimenti.
<b>Distribuzione</b>	Costante	Quando un versante presenta movimenti continui nel tempo.
	Retrogressiva	Quando un movimento franoso tende ad espandersi verso monte.
	Avanzate	Quando un movimento franoso tende ad espandersi verso valle coinvolgendo masse di terreno sempre più maggiori.
	In allargamento	Quando un movimento franoso tende ad espandersi verso le parti laterali del versante.
	In diminuzione	Quando una frana si manifesta su un terreno precedentemente coinvolto nei movimenti.
	Multidirezionale	Un versante o una parte di esso coinvolto in un movimento complesso.
	Confinata	Quando i movimenti si manifestano nelle parti differenti del versante e si possono osservare delle deformazioni al piede.

*Tabella 1 - Aspetti fondamentali nello studio di un fenomeno franoso*

## CAPITOLO 2

### Sistemi di monitoraggio di un fenomeno franoso

L'attività di monitoraggio di un movimento franoso può avvalersi di vari sistemi, tra cui:

1. Rilievi topografici
2. Monitoraggio geotecnico
3. SAR (Synthetic Aperture Radar)
4. WSN (*Wireless Sensor Network*)
5. TLS (Terrestrial Laser Scanner) o LiDAR
6. Fotogrammetria

Alle tecniche di monitoraggio si possono affiancare dei sistemi di trasmissione (reti radio, sistemi satellitari, reti GSM, ecc) e altri strumenti per il monitoraggio delle condizioni al contorno come le stazioni meteorologiche.

#### 2.1 I rilievi topografici

I rilievi topografici di precisione possono essere effettuati con diverse tipologie di strumentazione come stazioni totali, sia robotizzate che manuali e ricevitori GNSS. Le stazioni totali hanno un costo che varia da 500 euro per una stazione totale manuale e 60.000 euro per una stazione totale robotizzata. Per il controllo sul corpo frana sono previste un'installazione di capisaldi di misura e postazioni fisse per la messa in stazione della strumentazione topografica. I capisaldi presentano dei limiti di utilizzo, ovvero possono essere installati fino a 1.800 m di distanza rispetto alla stazione totale. Le stazioni totali si installano fuori corpo frana nella prossimità dei punti critici di essa. Se la frana è di grandi dimensioni, possono essere impiegate più stazioni di misura. Le stazioni totali possono essere robotizzate con controllo remoto (SLR), in modo da eseguire cicli di misura a cadenza oraria e trasmettere i dati raccolti via GSM. La frequenza di acquisizione dipende dalla velocità del fenomeno franoso e va da misure anche sub-orarie a poche misure anno (da 1 a 5 all'anno) per i movimenti più lenti. Sul corpo frana si installano dei prismi e il monitoraggio topografico avviene attraverso la collimazione automatica di essi. Di maggiore importanza è la coerenza

del dato raccolto, al fine di individuare gli eventuali errori di misura, dei valori anomali e/o sospetti, con una procedura basata sui controlli della coerenza del dato. Per un maggiore controllo si fa un confronto con la serie storica. Questa procedura può tenere conto anche di ulteriori informazioni come: pendenza, esposizione del versante preso in analisi. In base alla frequenza di misura, questi test della coerenza del dato possono avere una frequenza da giornaliera a mensile. I rilievi della stazione totale danno informazioni sulle tre componenti di spostamento grazie alla misura tridimensionale del punto di monitoraggio. La precisione di questi rilievi ha un ordine di grandezza variabile dal centimetro al millimetro, in funzione delle distanze tra la stazione totale e i prismi. La precisione sulle distanze è data dalla seguente relazione:

$$\sigma_D = K + PPM \cdot D \quad (1)$$

Ove:

K= costante errore strumentale

PPM = errore medio kilometrico (parti per milione)

D = distanza misurata espressa in km

Le misure delle distanze, grazie all'utilizzo del prisma, possono essere eseguite sino a distanze pari a 3 km, in funzione delle caratteristiche della stazione totale. Il punto dove si trova la stazione totale deve essere facilmente raggiungibile, comodo, sicuro. Questi sistemi si impiegano comunemente per frane complesse, sia con movimenti veloci che lenti.



*Figura 14 - Esempio di una stazione totale robotizzata [8]*



*Figura 15 - Esempio di un prisma installato nel corpo frana [8]*

## **2.2 Strumentazione geotecnica**

Questi strumenti possono essere:

- Estensimetri di superficie, a barra o a filo – tipicamente sono strumenti monodimensionali, ma in talune configurazioni è possibile misurare anche tutte e tre le componenti di movimento con particolari estensimetri a barra. Si usano per acquisire informazioni puntuali relative all'apertura di una frattura. Per quanto riguarda il funzionamento, lo spostamento di uno dei due punti di misura modifica la lunghezza del filo o della barra e viene registrato da un apposito sensore collegato ad una centralina.
- Estensimetri di profondità – sono utilizzati nel corpo frana, controllando i movimenti di un certo numero di punti installati in modo permanente in profondità dentro una perforazione (estensimetro multibase). Il sistema di acquisizione dati può essere automatico o manuale, con una precisione millimetrica. Trovano applicazione nel monitoraggio dei fenomeni franosi con movimenti lenti, di tipo scorrimento, anche di notevoli dimensioni, dove si possono installare più dispositivi.

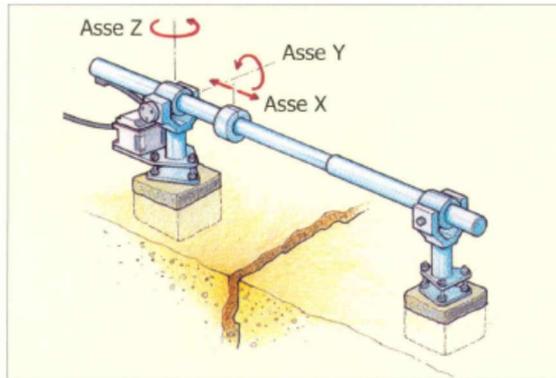


Figura 16 - Schema di un estensimetro a barra [9]

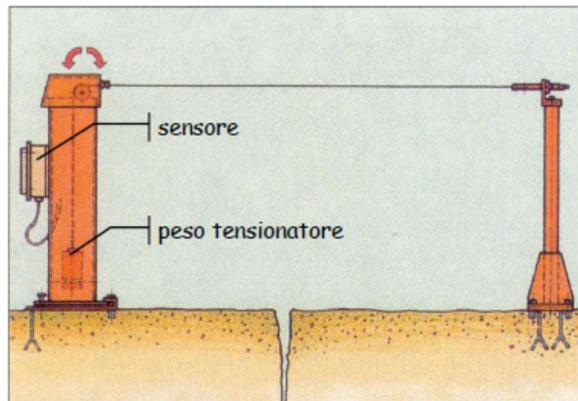


Figura 17 - Schema di un estensimetro a filo [9]

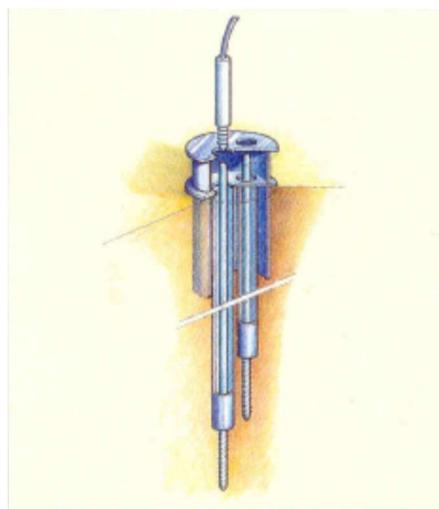
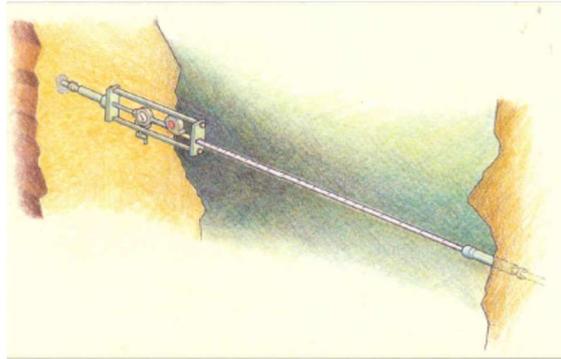


Figura 18 - Schema di un estensimetro di profondità [9]

- Distometri – che consentono di misurare manualmente le variazioni di distanza tra due punti fissi (es: le pareti di una grossa fessura di una frana). Consentono di misurare con una precisione del centesimo di millimetro. Con questi tipi di strumenti si effettuano tre misure, da cui va considerato il valore medio. Questi strumenti permettono un monitoraggio di una parte di un movimento franoso e trovano applicazione nei crolli e/o ribaltamenti di grandi dimensioni.



*Figura 19 - Schema di un distometro [9]*

- Fessurimetri – consentono di misurare le piccole fratture nei movimenti franosi con una precisione millimetrica. Possono essere di vario tipo: lineari, misuratori di giunto monoassiali, elettrici. Non trovano applicazione nei crolli, essendo un pericolo per gli operatori e per la strumentazione.



*Figura 20 - Fessurimetro elettrico [10]*

- Inclinometri – costituiti da un tubo di sezione circolare con 4 guide inserito in una perforazione appositamente realizzata. La deformazione del tubo può essere misurata con una sonda inclinometrica manuale oppure una colonna inclinometrica fissa. Il passo delle misure è solitamente un metro. Nel caso di sonde automatizzate,

i dati vengono trasmessi in automatico, con la prima lettura considerata “a zero” e le successive facendo riferimento a questa. Questi strumenti trovano applicazione specialmente nel monitoraggio delle frane di grosse dimensioni.

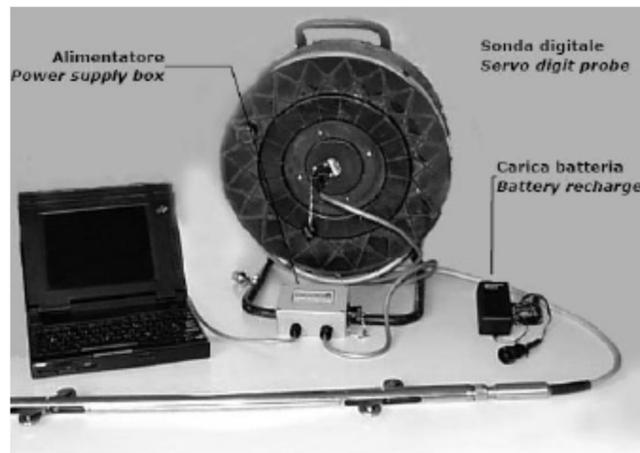


Figura 21 - Sistema inclinometrico digitale [9]

- Piezometri – possono essere a tubo aperto, per misurare il livello di falda, o di tipo Casagrande, con lo scopo di misurare la pressione interstiziale. Possono essere elettrici con le centraline di misura, per le misure di continuo. Siccome la componente idrica del terreno può essere un fattore scatenante di una frana, questi strumenti trovano una larga applicazione nel monitoraggio.

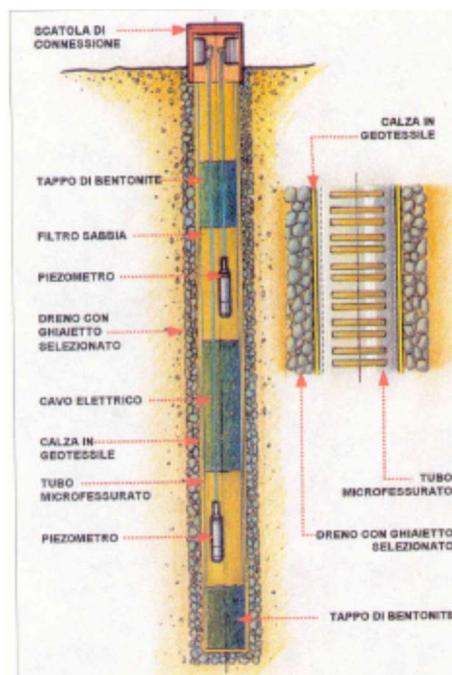


Figura 22 - Schema di un piezometro per il controllo delle falde acquifere. Nell'immagine è presentato un sistema con più livelli di misurazione delle pressioni interstiziali [9]

La strumentazione geotecnica, è un efficiente sistema che consente nel tempo di definire: i movimenti in atto con la loro variazione spazio-temporale, la dipendenza dei movimenti al cambiare delle condizioni meteorologiche, l'influenza dei fattori esterni sullo stato di attività di una frana. Nello stesso tempo, essi possono essere impiegati per valutare l'efficienza di eventuali opere di stabilizzazione e/o consolidamento, con un controllo permanente nel tempo, con possibilità di valutare l'apertura delle fratture.

Il monitoraggio con i sistemi geotecnici ha un costo elevato di installazione, gestione e manutenzione del sistema, e si deve garantire una continuità di misura.

### 2.3 Il SAR (Syntetic Aperture Radar)

Può essere da satellite o da terra. Si tratta di un radar di tipo convenzionale montato su una piattaforma aerea o satellitare, con l'antenna puntata verso terra, ortogonalmente verso la direzione del moto. Questo sistema acquisisce continuamente dati con cui si elaborano delle immagini periodiche, con cui, in base ad analisi degli interferogrammi, ovvero la differenza fra due immagini radar, è possibile stimare lo spostamento di una frana, con una precisione che può scendere sotto il centimetro. Il SAR presenta il vantaggio che può acquisire immagini indipendentemente dalle condizioni meteorologiche sia di giorno che di notte. Nello stesso tempo, comporta lo svantaggio di essere affetto dal fenomeno "speckle", ovvero una distorsione dei pixel dell'immagine ciò che può complicare l'interpretazione di essa. [11] Un altro svantaggio lo costituisce il costo abbastanza elevato della strumentazione e di rilievo e un carico computazionale elevato. Questa tecnica non trova applicazione nei movimenti veloci e non è possibile il monitoraggio in tempo reale, perché le immagini vanno prima processate.

Questa tecnica risulta particolarmente adatta per le frane di grandi dimensioni, in rapida evoluzione, con reale pericolo di crollo e/o ribaltamento anche se la precisione di questa tecnica arriva fino al centimetro in planimetria e fino al millimetro in altimetria

Nella figura seguente è riportato il satellite europeo ERS 2, che trasporta anche un SAR.

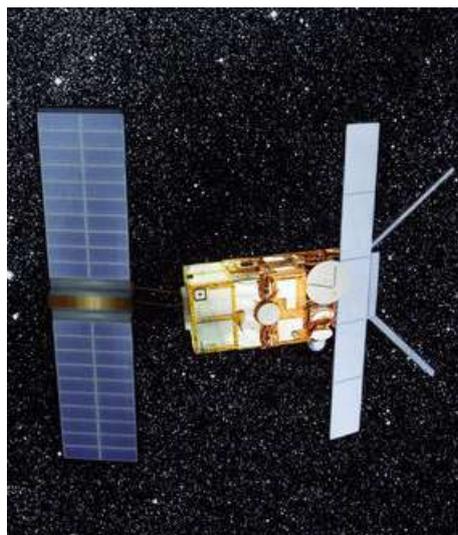


Figura 23 - ERS 2 - European Remote Sensing [12]

## 2.4 Il WSN (*Wireless Sensor Network*)

Il WSN (*Wireless Sensor Network*) – è un sistema innovativo per il collegamento e la gestione dei sensori utilizzati nel monitoraggio geotecnico a cui possono essere collegate anche le centraline meteorologiche. Questo sistema ha i vantaggi: di essere a basso costo, facilmente rilocabili, autonomi e controllabili da remoto, con una copertura densa, sono operativi per alcuni anni, possono essere alimentati a batterie solari, sono apparecchi robusti e con facilità d'uso.



Figura 24 - Esempio di uso del sistema WSN [13]

## 2.5 LIDAR

LIDAR (acronimo di Light Detection and Ranging) è una tecnica di rilevamento che consente di misurare automaticamente la distanza di un oggetto o di una superficie utilizzando un impulso laser, al fine di ottenere un profilo (nel caso 2D) o una nuvola di punti (nel caso 3D) di coordinate note, in un sistema locale oppure assoluto.

Esistono differenti versioni di sistemi LIDAR, quelli basati su distanziometri e quelli triangolatori. I primi, grazie alle portate raggiungibili, vengono solitamente utilizzati per il monitoraggio. I secondi, vengono spesso utilizzati per rilievi a corto range (< 70m) in cui vengono richieste elevate precisioni. Il principio di funzionamento di un LIDAR con distanziometro è quello del calcolo della distanza come tempo di volo di un impulso laser. Al calcolo del tempo di volo si associa anche una misurazione angolare di precisione. L'intervallo di tempo tra l'impulso trasmesso e l'impulso ricevuto, permette di individuare la distanza di ogni punto rilevato. La densità di punti rilevati è stabilita dall'operatore, impostando la risoluzione angolare. La rotazione dello specchio crea la spaziatura tra i differenti punti rilevati e genera una nuvola di punti, in questo modo, si rileva la superficie/oggetto indagato. Con questa tecnica si possono generare Modelli Digitali del Terreno – DTM - ad altissima

risoluzione, integra facilmente i rilievi con la topografia e la fotogrammetria, analizza lo stato di degrado dei materiali, consente una navigazione virtuale, attraverso una misurazione automatizzata e la localizzazione di migliaia di punti senza l'uso dei prismi riflettenti, nell'area dove è stato installato.

Ha una serie di vantaggi tra cui: un rilievo completo e realistico usando l'azione combinata dell'accuratezza del laser e delle immagini fotografiche acquisite, elevata quantità e qualità di dati ottenuti in breve tempo, può essere usato per i rilievi in zone complesse, come sono le frane con imminente pericolo di crollo e/o ribaltamento, può lavorare indipendentemente sia di giorno che nella notte.

Allo stesso tempo, questa tecnica ha alcuni difetti tra cui: il suo costo abbastanza elevato, sia di strumentazione che di rilievo, la necessità di personale altamente qualificato, necessità di collegamento ai sistemi GPS per individuare punti di riferimento e orientare le scansioni.

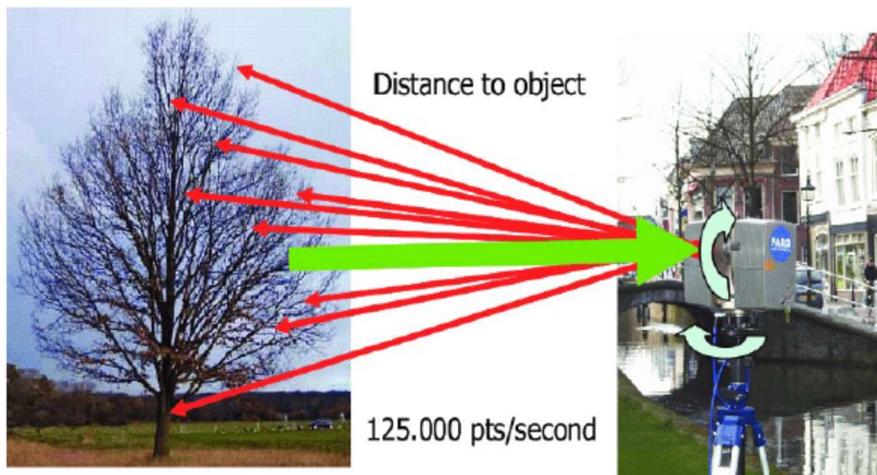


Figura 25 esempio di laser scanner - Leica HDS600 – [14]

## 2.6 Fotogrammetria

“Con il termine fotogrammetria s'intende l'insieme di tutti i procedimenti analitici, grafici e ottomeccanici attraverso i quali, dato un sufficiente numero di fotografie di un oggetto prese da punti diversi, è possibile ricostruire l'oggetto o determinate sue proiezioni. Da un punto di vista topografico della rappresentazione, la fotogrammetria serve a passare da un tipo di rappresentazione legato alle immagini fotografiche “prospettive centrali” alle tavole architettoniche definite da “proiezioni ortogonali”. La principale distinzione che può essere operata all'interno della fotogrammetria risulta essere quella tra fotogrammetria terrestre e quella aerea.” [15]

Per le frane di grandi dimensioni e in rapida evoluzione, poco accessibili con la strumentazione tradizionale, questa tecnica offre un'opportunità, attraverso voli fotogrammetrici, di monitorarle in modo efficace.

Un volo fotogrammetrico si realizza con un aereo dove si montano delle camere digitali per acquisire i fotogrammi. Le camere per uso fotogrammetrico utili per il monitoraggio delle frane sono:

- camere metriche – che hanno l'orientamento interno noto e costante nel tempo;
- camere semimetriche – che hanno l'orientamento interno noto e variabile nel tempo.

Con l'orientamento interno si intende la calibrazione della camera. I parametri dello orientamento interno sono: sistema di riferimento immagine ( $\xi_1, \eta_1$ ) e la distanza principale  $c$ . In questo sistema di riferimento, ad ogni pixel dell'immagine si possono associare delle coordinate reali. Con una coppia di fotogrammi si possono misurare le coordinate immagine di punti omologhi su due immagini. Dato che le camere per uso fotogrammetrico presentano degli effetti deformativi, la proiezione del punto reale avviene con uno scostamento ( $\Delta\xi, \Delta\eta$ ), che deve mantenersi entro certi limiti. Conoscendo la legge di deformazione o la sua approssimazione, si possono correggere le coordinate misurate per avvicinarsi a quelle teoriche.

Le quantità  $B$  e  $c$  sono prive di errori. La precisione nel determinare le coordinate reali è una misura indiretta. Con la legge della propagazione della varianza si ottengono le equazioni che esprimono gli scarti quadratici medi delle coordinate reali nel caso di una presa fotogrammetrica normale:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sqrt{\left(\frac{\xi_1}{c} m_b \frac{Z}{B} \sigma_{P_\xi}\right)^2 + (m_b + \sigma_\xi)^2} \\ \sigma_y &= \sqrt{\left(\frac{\eta_1}{c} m_b \frac{Z}{B} \sigma_{P_\xi}\right)^2 + (m_b + \sigma_\eta)^2} \\ \sigma_z &= \frac{Z^2}{c \times B} \sigma_{P_\xi}\end{aligned}\quad (2)$$

Ove:

$B/Z$  – rappresenta il rapporto di base;

$Z/c$  – rappresenta il fattore di scala;

$m_b$  – rappresenta il denominatore del rapporto di scala [16]

Oltre alle equazioni (2) che danno la precisione della presa fotogrammetrica, ci sono anche delle regole empiriche per stimare la precisione dei punti isolati:

- planimetria:  $\pm 6 \mu\text{m}$  sul fotogramma;
- $\pm 0.06$  per mille della distanza di presa (camere normali e grandangolari);
- $\pm 0.08$  per mille della distanza di presa (camere supergrandangolari).

## 2.7 Sistemi aeromobili a pilotaggio remoto (SAPR)

I sistemi aeromobili a pilotaggio remoto (SAPR) sono dei droni utilizzati in vari campi tra cui anche il monitoraggio che hanno subito un notevole impulso negli ultimi anni, soprattutto con lo sviluppo di centraline in grado di gestire il volo in maniera autonoma e con la miniaturizzazione della sensoristica dedicata. I droni sono dei velivoli di dimensioni ridotte e leggeri senza pilota a bordo e controllati “da remoto” attraverso una stazione a terra [17].

ENAC (Ente Nazionale Aviazione Civile) ha introdotto una classificazione di questi velivoli, in base alla massima massa al decollo.

Esistono due macro-classi:

- Droni con massima massa al decollo tra 2 kg e 25 kg;
- Droni con massima massa al decollo maggiore di 25 kg e non superiore a 150kg.

In seguito sono state aggiunte altre due classi:

- Droni con massa operativa al decollo minore di 300 grammi;
- Droni con massa operativa al decollo tra 301 grammi e 2 kg.

Nei ultimi anni, oltre ai modelli ad ala fissa il mercato ha reso disponibile un numero crescente di modelli a multirottore. Questi ultimi, consentono un loro utilizzo anche in spazi ristretti e con maggiore semplicità, avendo la possibilità di effettuare sia un volo verticale che stazionario. I droni possono avere a bordo delle fotocamere digitali o dei laser scanner, con cui si possono ottenere delle ortofoto per produrre i modelli digitali delle elevazioni (DEM) e i modelli digitali del terreno (DTM).

Le applicazioni dei droni sono: pronto intervento, monitoraggi e ispezioni di sicurezza, misure del territorio e modellazioni 3D. Questa tecnologia offre numerosi vantaggi tra cui una rapida condivisione dei dati e immagini ed un'accessibilità sui terreni in forte pendenza e con imminente pericolo di crollo. In particolare i multirottore hanno anche la limitazione di avere una scarsa autonomia di volo.



Figura 26 - Esempio di un drone equipaggiato con un laser scanner [17]

## CAPITOLO 3

### Il sistema GNSS

GNSS (Global Navigation Satellite System) è il sistema di posizionamento basato sulla ricezione dei segnali radio trasmessi da diverse costellazioni di satelliti artificiali.

Il sistema è composto da varie costellazioni, ove le principali sono GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS. Fanno parte del sistema GNSS servizi di augmentation della precisione e dell'affidabilità, quali satelliti geostazionari e componenti locali di terra. Alcune costellazioni hanno validità globale e permettono il posizionamento, sia autonomo che tridimensionale, in qualunque momento e in ogni punto della Terra. Altre hanno validità regionale. Attualmente alcune costellazioni sono complete (GPS e GLONASS) e altre sono in via di completamento (Galileo, BeiDou, QZSS).

Le principali caratteristiche delle costellazioni GNSS sono descritte nella seguente tabella.

Costellazioni	Sistema	Nr. satelliti	Altezza orbitale dei satelliti (km)	Inclinazione rispetto al piano equatoriale	Periodo del satellite	Tipo segnale
GPS	Globale	31	20200	55°	11 ore e 56 min	civile e militare
GLONASS	Globale	24	19100	64.8°	11 ore e 15 min	civile e militare
GALILEO	Globale	22	29.601.297	56°	14 ore	civile e militare
BeiDou	Globale	5 Geo	35786	55°	12 ore 53 min	civile e militare
		3 IGSO	35786			
		27 MEO	20528			
QZSS	Locale	4	-	-	12 ore	civile

Tabella 2 - Le costellazioni attualmente presenti nella struttura GNSS

### 3.1 Struttura dei sistemi GNSS

Ogni costellazione del sistema GNSS prevede tre parti:

- *Segmento spaziale*: costituito da satelliti MEO (*Medium Earth Orbit*), in orbita pressoché circolare intorno alla Terra ad altezza variabile, a seconda della costellazione, da circa 19.100 km a circa 23.200 km dalla superficie terrestre. In alcuni sistemi sono presenti satelliti geostazionari GEO. Ogni satellite ha una vita che varia dai 7 a 10 anni. “Ogni costellazione globale, se completa, permette la visibilità di almeno 4 satelliti in qualunque luogo e ora, a partire da un’elevazione di 15° sull’orizzonte, costituendo i requisiti fondamentali per il posizionamento. Ogni satellite porta a bordo orologi atomici al Cesio e al Rubidio, per garantire un costante e stabile riferimento temporale. [18]

Le funzioni dei satelliti possono essere:

- “Trasmettere informazioni agli utilizzatori mediante un segnale radio piuttosto complesso;
- Mantenere un riferimento di tempo accurato, grazie agli orologi atomici di bordo;
- Ricevere e memorizzare informazioni dal segmento di controllo.

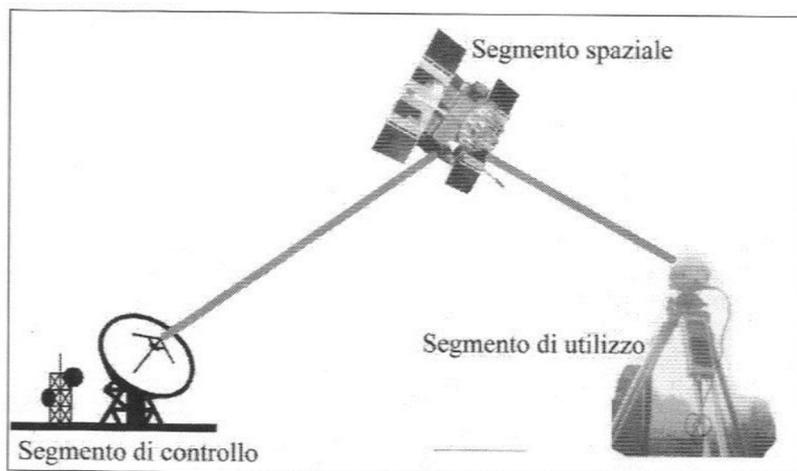


Figura 27 - I segmenti dei sistemi GNSS [18]

- *Segmento di controllo*: è l’insieme delle stazioni a terra che gestiscono il sistema e i cui compiti sono:
  - “tracciare”, ovvero seguire in maniera continua i satelliti ed elaborare i dati ricevuti per calcolarne la posizione spazio-temporale (effemeridi);
  - controllare gli orologi dei satelliti e modellarne gli errori;
  - imporre manovre di orbita;
  - memorizzare nuovi dati sui satelliti, fra i più importanti ci sono le “effemeridi” previste per le successive ore, che vengono trasmesse agli utilizzatori del sistema.
- Il *segmento di utilizzo*: è costituito dall’utenza dotata di ricevitori con antenna. Questi sono strumenti di tipo “passivo”, ovvero non emettono segnali, ma sono in grado di acquisire dati”. [18]

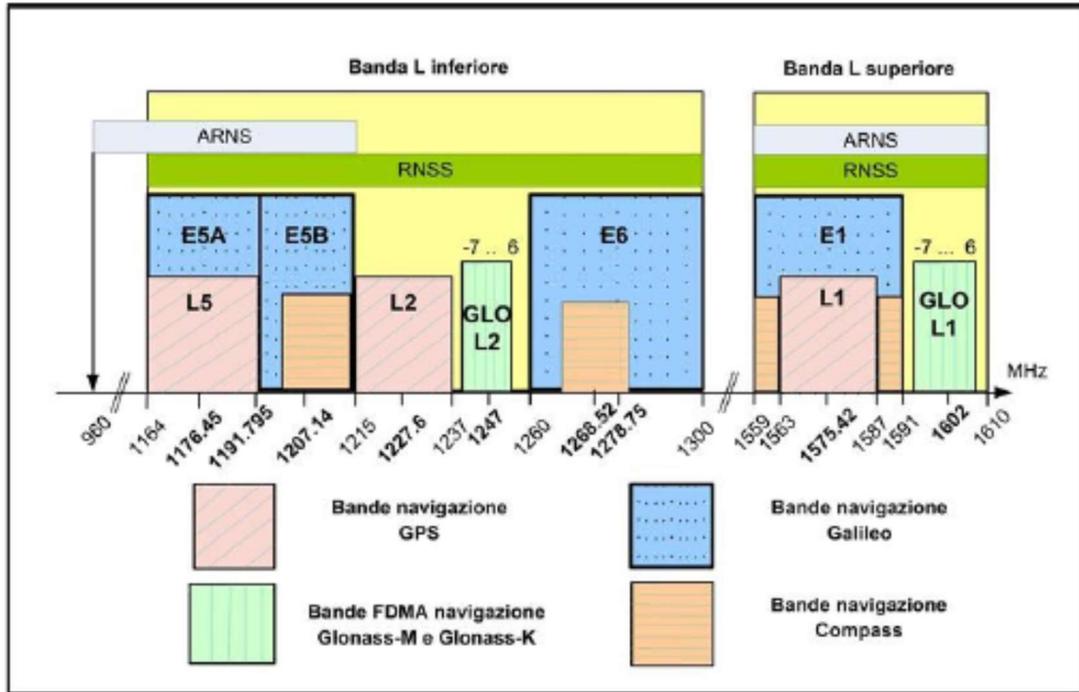


Figura 28 – Frequenze di navigazione per il sistema GNSS [19]

### 3.1.1 Il sistema GPS

Si tratta di un sistema di satelliti progettato per essere in grado di effettuare il posizionamento tridimensionale in ogni luogo ed in ogni momento, di oggetti in maniera statica e in movimento. E' costituito da 18 stazioni di controllo a Terra che hanno il compito di gestire il sistema, tra cui una principale detta "Master Control Station (MCS)", ubicata in Colorado Springs – California e una secondaria, "alternate Master Control Station" sempre in California. Le stazioni di controllo mandano periodicamente ai satelliti il messaggio di navigazione, controllando la loro salute. Le altre 16 stazioni sono disposte in tutto il mondo e oltre a "tracciare" i satelliti, raccolgono dati atmosferici e di range da mandare alla stazione Master.



Figura 29 - Esempio di un satellite GPS [20]

Il sistema di riferimento, detto anche DATUM del GPS è WGS84 (World Geodetic System 1984), su cui sono calcolate le posizioni dei satelliti e la posizione del ricevitore.

Gli orologi a bordo dei satelliti che appartengono alla costellazione GPS, producono una frequenza fondamentale  $f_0$ , a cui corrisponde una lunghezza d'onda  $\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{f_0}$  m/s. Da questa frequenza fondamentale si originano tre parti fondamentali del segnale trasmesso:

- **Componente portante:** - onde sinusoidali, generate moltiplicando la frequenza fondamentale per coefficienti noti. Risulta essere molto importante l'utilizzo di più frequenze. In questo modo si eliminano alcune cause di errori e si può determinare l'ambiguità di fase in maniera rapida e affidabile, condizione fondamentale per il posizionamento in tempo reale (RTK);
- **Componente impulsiva (codici)** – onde quadre formate da transizioni di valori +1 e -1, generate da un algoritmo che si ripete periodicamente nel tempo. Vengono detti, "pseudo casuali" o PRN (Pseudo Random Noise). Alcuni codici sono disponibili per uso civile (C/A), ed altri per uso militare (P);
- **Componente messaggio (codice di navigazione)** – "contiene importanti informazioni come le effemeridi dei satelliti, ovvero i parametri per il calcolo della loro posizione, il loro stato di salute, informazioni sugli errori degli orologi di bordo" [18] e sui ritardi del segnale nello strato ionosferico.

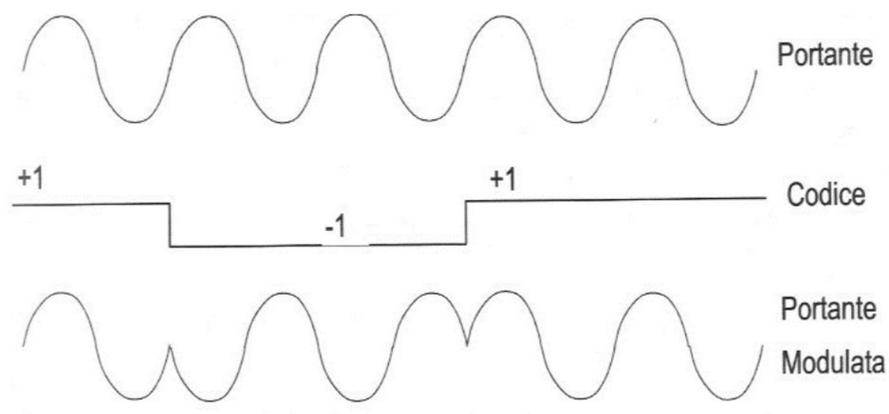


Figura 30 - Effetto della portante [18]

Componente portante		
Frequenza fondamentale ( $f_0$ ) (MHz)	Frequenze generate da quella fondamentale (MHz)	Lunghezza d'onda (cm)
10.23	$f_{L_1} = 154 \cdot f_0 = 1575.42$	19
	$f_{L_2} = 120 \cdot f_0 = 1227.60$	24
	$f_{L_5} = 115 \cdot f_0 = 1176.45$	25

Tabella 3 - Caratteristiche della componente portante della costellazione GPS

Il segnale trasmesso (Broadcast signal) è dunque quello della portante modulata dai vari codici – come presentato nella figura sopra riportata.

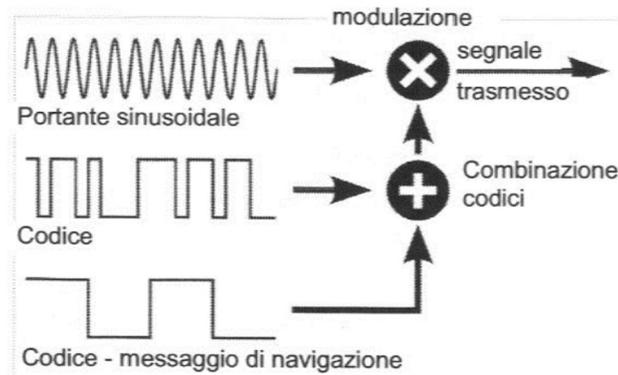


Figura 31 - Modulazione di una portante con codici [18]

La misura della distanza tra i centri di fase delle antenne del ricevitore e del satellite, necessaria per il posizionamento, viene ricavata secondo due modalità:

- Misure di codice – a partire dal tempo di propagazione del segnale dal satellite al ricevitore, misurato sul codice che modulano le portanti. L'equazione (3) rappresenta il calcolo del range tra il satellite e il ricevitore, in assenza di errori.

$$\rho_i^j = c\Delta t \quad (3)$$

Ove:

$\rho_i^j$  = range tra il satellite j e il ricevitore i;

c = velocità della luce;

$\Delta t$  = tempo di volo. [18]

- Misure di fase – a partire dal numero di cicli interi e dalla parte frazionaria dell'onda sinusoidale. Nelle misure di fase è presente l'ambiguità di fase (N – nella Figura 32) che rappresenta il numero intero di cicli compresi fra il satellite e il ricevitore che è una quantità incognita dove si conosce solo la natura intera.

$$\rho_i^j(t) = \phi_i^j(t)\lambda + N_i^j\lambda + c[\delta_i(t) + \delta_j(t)] \quad (4)$$

Ove: -  $\phi_i^j$  – misura di fase espressa in cicli;

$\lambda$  – lunghezza d'onda;

$\rho_i^j$  = range geometrico tra il satellite j e il ricevitore i;

$N_i^j$  = ambiguità di fase;

$\delta_i, \delta_j$  = errori d'orologio del satellite j e del ricevitore i. [18]

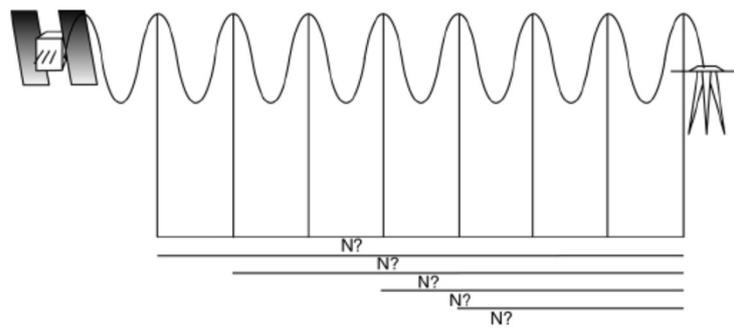


Figura 32 – Ambiguità di fase [21]

La scala di tempo GPS è mantenuta dall'orologio atomico Master Control Station dal centro di controllo, senza portare alcuna correzione astronomica per la rotazione terrestre.

### 3.1.2 Il sistema GLONASS

E' un sistema satellitare di posizionamento per applicazioni terrestri, aeree e marine in qualsiasi momento da un numero imprecisato di utenti e comprende 24 satelliti, appartenenti a tre blocchi: primo blocco, che sono dei satelliti lanciati in orbita fra 1982 e 2007 e hanno una vita media di 3-4,5 anni; secondo blocco che sono dei satelliti lanciati fra 2003 e 2015 e che presentano anche il secondo segnale, con una vita media di 7 anni; terzo blocco - detto anche il "blocco K", essendo dei satelliti lanciati fra 2008 e 2015, che presentano anche il terzo segnale, con una vita media di 10 anni.



Figura 33 - Esempio di satellite GLONASS [20]

La scala di tempo GLONASS è mantenuta dall'orologio atomico della Master all'idrogeno che periodicamente vengono calcolate le correzioni rispetto alla scala UTC e sono inviate ai satelliti. due volte al giorno.

Il sistema di riferimento della costellazione GLONASS è PZ90 con un aggiornamento nel 2007 chiamato PZ90.02, che è anche questo un sistema ECEF.

IL segnale radio trasmesso dalla costellazione GLONASS si origina da una frequenza fondamentale  $f_0=5.0\text{MHz}$ , essendo composto da componenti portanti sinusoidali modulate da codici. Dalla frequenza fondamentale si generano le tre portanti  $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_3$ , l'ultima essendo presente sui satelliti appartenenti al blocco K.

Componente portante		
Frequenza fondamentale ( $f_0$ ) (MHz)	Frequenze generate da quella fondamentale (MHz)	Lunghezza d'onda (cm)
5.0	$f_1= 1602+0.5625K$	19
	$f_2= 1246+0.4375K$	24
	$f_3= 1201.5+0.42187K$	25

Tabella 4 - Caratteristiche della componente portante del segnale della costellazione GLONASS

I satelliti lanciati dopo il 2005 hanno in uso un numero K del canale compreso fra: -7 e 8.

Le sottoportanti  $L_1$ , e  $L_2$  sono modulate da: PR ranging code, che si ripete ogni millisecondo e messaggio di navigazione contenente dati 'immediati', tra cui: il numero del satellite, differenze fra scale di tempo del satellite e scala GLONASS, effemeridi e "non immediati" tra cui: indicazioni sullo stato di salute de satelliti – vedi Figura 28 e Figura 31.

### 3.1.3 Il sistema Galileo

E' il sistema satellitare europeo interoperabile con GPS e GLONASS, in costruzione, che avrà, al suo completamento 27 satelliti e 3 di riserva disposti su tre piani orbitali. Tra il 2011 e il 2016 sono stati lanciati in orbita un numero di 14 satelliti, tra il 2016 e il 2017, altri 8 satelliti e nel 25 luglio 2018 altri 4 satelliti.

Il sistema di riferimento della costellazione viene chiamato GTRF (Galileo Terrestrial Reference Frame).

La scala di tempo Galileo prende il nome di GST. Nel messaggio di navigazione sono contenuti i coefficienti per calcolare l'offset tra la scala GST e le altre scale, per un'interoperabilità tra le costellazioni;

Il segnale della costellazione viene trasmesso su quattro frequenze: la  $E_1$  che coincide con la  $L_1$  della costellazione GPS,  $E_{5a}$  che coincide con la  $L_5$  sempre della costellazione GPS,  $E_{5b}$  e  $E_6$ .

Componente portante	
Frequenza fondamentale ( $f_0$ ) (MHz)	Frequenze generate da quella fondamentale (MHz)
154	$E_1 = L_1 = 1575.42$
125	$E_6 = 1278.75$
120	$E_5 = 1191.795$
115	$E_{5a} = L_5 = 1176.45$
128	$E_{5b} = 1207.14$

Tabella 5 – Caratteristiche della componente portante del segnale della costellazione GALILEO

Le portanti sono modulate da codici che hanno una componente in fase (I) e una in quadratura e su tutte e due le componenti viene trasmesso il segnale. La trasmissione dei dati viene raggruppata in tre categorie in base all'urgenza: urgenti, mediamente urgenti o con bassa velocità.

### 3.1.4 Il sistema BeiDou

E' il sistema di posizionamento cinese diviso in BeiDou 1 essendo composto da tre satelliti geostazionari e BeiDou2, chiamato anche COMPASS, seguendo i principi di posizionamento simili a GPS, GLONASS e Galileo, con una copertura in due fasi: del territorio cinese e limitrofe e la seconda con una copertura globale. Quando la costellazione sarà al completo sarà composta da: 5 satelliti geostazionari, 3 satelliti con lo scopo di orbitare sul territorio cinese permettendo il posizionamento anche in presenza di ostacoli e 27 satelliti con orbita globale.

Il sistema di riferimento viene chiamato CGCS2000 che è anch'esso un sistema ECEF.

Nella scala di tempo BeiDou, detta BDT, si contano i secondi della settimana ed è periodicamente controllata per avere un offset rispetto al tempo UTC inferiore a 100ns ed il leap second è trasmesso nel messaggio di navigazione

Il segnale viene trasmesso su tre frequenze, alcune di esse sono comuni con GPS e GLONASS.

$$\begin{aligned} B1/L1 &= 1575.42 \text{ MHz} \\ B2/L6 &= 1268.52 \text{ MHz} \\ B3/E5b &= 1191.795 \text{ MHz} \end{aligned} \quad (5)$$

### 3.1.5 Il sistema QZSS

E' il sistema Giapponese con un posizionamento che non è globale, ovvero "la costellazione orbita sul Giappone come ausilio alle altre costellazioni".



Figura 34 - Il sistema QZSS [22]

Questo sistema nasce per migliorare il servizio di posizionamento, essendo compatibile con il sistema GPS con cui può essere utilizzato in modo integrato.

Il sistema QZSS è operativo dal novembre 2018 ed è costituito da 4 satelliti: tre con un'orbita satellitare *quasi-zenith* (QZO) e uno con un'orbita *geostazionaria* (GEO). Primo di essi fu lanciato nel 2016.

Al momento, si considera che il numero dei satelliti GPS non è sufficiente per migliorare il servizio di posizionamento, specialmente per gli errori multipath. Per questa ragione si prevede l'aumento dei satelliti della costellazione QZSS.

## 3.2 Errori nelle misure GNSS

Tutto ciò che non può essere interpretato come distanza tra il satellite ed il ricevitore viene definito come errore, che influisce sulle misure di range e dunque sulla precisione con cui si può determinare la posizione con GNSS. “Secondo una classica definizione, gli errori che si possono commettere nella misura del range sono di tre tipi:

1. Errori accidentali di misura;
2. Errori sistematici o di modello (bias): rifrazione troposferica e ionosferica, errori di orologio, errori di orbita;
3. Errori vari di osservazione: percorsi multipli (multipath), elettronica del ricevitore, interferenze elettromagnetiche, variazione del centro di fase dell’antenna”.

Errori che possono arrivare anche ad alcuni metri, per il posizionamento assoluto con misure di codice, non possono essere tollerati per scopi geodetico – topografici e cartografici. Si elencano di seguito i vari tipi di errore:

1. Errori accidentali – la precisione può essere stimata come l’1% della lunghezza d’onda, come ad esempio nel GPS abbiamo:
  - Codice C/A: precisione =  $1\% \lambda = 1\% * 300\text{m} = \pm 3 \text{ m}$ ;
  - Codice P: precisione =  $1\% \lambda = 1\% * 30\text{m} = \pm 0,3\text{m}$ ;
  - Portanti L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, L<sub>5</sub>: precisione =  $1\% \lambda = 1\% * 20 \text{ cm} = \pm 2 \text{ mm}$
2. Errori sistematici o bias – “la classificazione dei bias può essere fatta in base alle loro caratteristiche di correlazione, oppure alla loro dipendenza dalla frequenza del segnale” essendo la somma dei vari bias, appartenenti a tre categorie: [18]
  - Orologi, dei satelliti e del ricevitore;
  - Sito di misura: multipath e variazioni di centri di fase delle antenne del satellite e del ricevitore;
  - Spazialmente correlati: ionosfera, troposfera, effemeridi tra i satelliti ed il ricevitore.

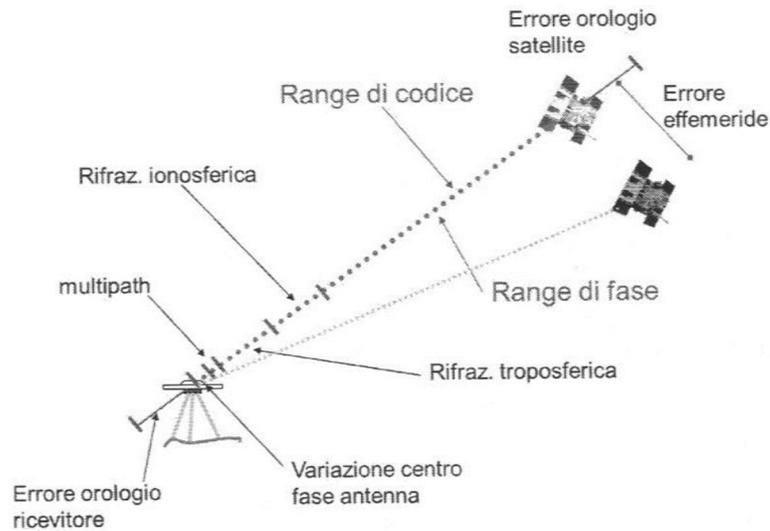


Figura 35 - Errori (bias) nelle misure GNSS [18]

I bias posso esser suddivisi in questo modo:

- Non dispersivi: sono gli errori indipendenti dalla frequenza, come le effemeridi, che hanno una correlazione spaziale elevata su grandi distanze e troposfera con la correlazione spaziale regionale;
- Non dispersivi, ma dipendenti dalla frequenza, come l'orologio del ricevitore, con una correlazione spaziale identica sulla stessa stazione e orologio del satellite, con una correlazione spaziale identica sullo stesso satellite;
- Dispersivi, che sono dipendenti dalla frequenza, come ionosfera, con una correlazione spaziale regionale, multipath, e centri di fase antenne, che sono senza correlazioni spaziali, ma dipendenti dal sito.

Un altro tipo di errore di osservazione è dovuto alla variazione della posizione del centro di fase dell'antenna; questo infatti non è un punto materiale, bensì un punto teorico, che varia in funzione della frequenza e dell'elevazione del satellite che emette il segnale.

Altri errori dipendono ancora dall'elettronica del ricevitore. Le misure di sfasamento avvengono tramite correlazione in tempo reale; perciò è importante che il segnale non sia "sporco" per un'ottimale correlazione. La qualità del segnale dipende anche da eventuali interferenze elettromagnetiche, che possono causare elevata rumorosità del segnale o, nel caso peggiore, la perdita di esso.

### 3.3 I formati dei dati GNSS

I dati In uscita sono di tipo grezzi, che possono essere successivamente elaborati, o coordinate, che sono in tempo reale. Questi dati sono generalmente forniti dai ricevitori GNSS e un ricevitore può inviare in tempo reale questi dati ad un altro ricevitore. Ogni strumento acquisisce i dati di codice e fase in formato proprio fornito dalla casa costruttrice dello strumento. Questo formato può essere facilmente convertito in un altro indipendente detto RINEX (Receiver Independent Exchange Format), che la maggior parte dei software sono in grado di leggere e scrivere.

Nel formato RINEX sono contenuti più tipi di file, tra cui i più importanti sono: file di osservazione .OBS e file di navigazione .NAV (file.YY0 e file.YYN, dove YY significa l'anno).

Nel file di osservazione si trova un'intestazione contenente: le coordinate ECEF, il tipo di ricevitore, tipo di osservazioni e altezza strumentale dell'antenna. Oltre all'intestazione, il file contiene le osservazioni di codice e di fase per ogni epoca di misura e per ogni satellite presente si ha una colonna. Anche nel file di navigazione si trova una testata che contiene informazioni riguardanti il tipo di file, data creazione file e diversi parametri per il calcolo dei ritardi ionosferici e del tempo UTC. I file di navigazione contengono le informazioni: orbitali per ogni satellite, i parametri con quali ogni ricevitore può calcolare la posizione dei satelliti. Nello stesso file vengono fornite le effemeridi relative ad ogni cambio nel tempo di visibilità del satellite.

```
2.11          N: GPS NAV DATA      G          RINEX VERSION / TYPE
LEICA GEO OFFICE 8.4          22-3-16 10:35      PGM / RUN BY / DATE
17                                     LEAP SECONDS
                                     END OF HEADER
2 16 3 21 12 0 0.0 5.989111959934D-04-4.547473508865D-13 0.000000000000D+00
9.400000000000D+01-7.728125000000D+01 5.255933022141D-09 4.911585213524D-02
-4.101544618607D-06 1.557828020304D-02 6.252899765968D-06 5.153742977142D+03
1.296000000000D+05-1.229345798492D-07-1.074393671300D+00 2.086162567139D-07
```

Figura 36 - Esempio di un formato rinex – file di navigazione

```

2.11          OBSERVATION DATA      M (MIXED)          RINEX VERSION / TYPE
teqc 2015Nov6          20160425 09:39:22UTC PGM / RUN BY / DATE
MSXP|IAx86-PII|bcc32 5.0|MSWin95->XP|486/DX+          COMMENT
LEICA GEO OFFICE 8.4          10-2-16 17:34          COMMENT
L1PhaOff: 0.0644 L2PhaOff: 0.0640          COMMENT
      C1  L1  D1  S1  P2  L2  D2  S2          COMMENT
*** START MOVING ANTENNA ! ***          COMMENT
3721116_11041593          MARKER NAME
3721116_11041593          MARKER NUMBER
          OBSERVER / AGENCY
351372          LEICA GX1230+ GNSS 8.71          REC # / TYPE / VERS
          LEIAX1202GG          ANT # / TYPE
4472461.7106 601657.5435 4492640.1323          APPROX POSITION XYZ
      0.0000      0.0000      0.0000          ANTENNA: DELTA H/E/N
      1      1          WAVELENGTH FACT L1/2
      8  C1  L1  D1  S1  P2  L2  D2  S2          # / TYPES OF OBSERV
teqc windowed: start @ 2015 Nov 16 11:04:16.000          COMMENT
teqc windowed: delta = 340.000 sec          COMMENT
      2015  11  16  11  4  16.0000000      GPS          TIME OF FIRST OBS
      17          LEAP SECONDS
          END OF HEADER
15 11 16 11  4 16.0000000  0 16G01G14G03G19G08G27G32G22G28G11R06R22
          R05R20R21R07
20862412.820 109632717.111 9 1568.830 50.450 20862413.480
85428093.81348 1222.464 46.650

```

Figura 37 - Esempio di un formato RINEX - file di osservazione

Il protocollo standard NMEA (National Marine Electronics Association) attraverso una porta seriale invia coordinate e informazioni sul posizionamento fra i ricevitori in tempo reale.

Il protocollo RTCM (Radio Technical Commission for Marine Services) fornisce in tempo reale misure, coordinate e correzioni differenziali.

Questo protocollo presenta delle versioni più evolute:

- RTCM 2.x – con la versione 2.1, che fornisce le correzioni di fase e osservazioni, 2.2 e 2.3, che offre le correzioni pseudorange con le loro variazioni, le coordinate della stazione (SR), misure di codice e di fase con le loro correzioni, messaggi proprietari. Tutti questi messaggi sono trasmessi in coppie e non si usano in contemporaneo;
- RTCM 3.x – sviluppata specialmente per la trasmissione dei dati di GPS e GLONASS per RTK e contengono informazioni su sistema di riferimento e sui parametri delle antenne. Questa versione accetta le modifiche all'introduzione dei nuovi codici e costellazioni, es. GALILEO. Ha un minor carico trasmissivo rispetto alla versione precedente.

I messaggi sono strutturati per gruppi, dove il provider trasmette almeno un messaggio per tipo. Questi gruppi contengono i seguenti tipi di messaggio:

- Osservazioni;
- Coordinate stazione;
- Descrizione antenna;
- Correzioni RTK di rete;
- Informazioni ausiliare;
- Parametri del sistema di riferimento.

IL formato FKP che è stato introdotto nel 2002, per contenere i parametri di correzione differenziale per RTK che non sono previsti nel precedente protocollo ed è usato dalle principali case costruttrici di ricevitori. In questo tipo di formato i termini di correzione

dispersivo (bias ionosferico) e non dispersivo (Bias troposferico e d'effemeride) sono separati dai contributi.

### 3.4 Metodologie del posizionamento GNSS

Il posizionamento GNSS può essere:

- posizionamento assoluto;
- posizionamento relativo;
- posizionamento differenziale;

Tutti questi tipi di posizionamenti generano due tipi di soluzioni: in tempo reale e post-processamento e utilizzano costellazioni GPS o GPS insieme a GLONASS. L'utilizzo di GLONASS aumenta il numero dei satelliti disponibili e in zone con presenza di ostruzioni che riducono la visibilità, si utilizza GPS+GLONASS.

#### 3.4.1 Il posizionamento assoluto

Per posizionamento assoluto si intende quello eseguito con un solo ricevitore, basandosi solo sui segnali ricevuti dai satelliti GNSS e può essere:

- “stand alone dove le coordinate di un vertice sono determinate in un sistema di riferimento globale” [18]. In questo tipo di posizionamento, dove il ricevitore rimane sullo stesso punto per alcune epoche di misura, sono presenti quattro incognite: tre di queste sono le coordinate del punto e la quarta incognita è il bias dell'orologio del ricevitore, per ogni epoca di misura. Se c'è la visibilità di almeno quattro satelliti si può arrivare ad una soluzione istantanea della posizione. Se il numero dei satelliti visibili è minore di quattro, per arrivare ad una soluzione della posizione, c'è bisogno di almeno tre epoche di misura. Quest'ultima combinazione satelliti – epoche di misura, non è preferibile per il condizionamento del sistema di equazioni di osservazioni. Con questo tipo di posizionamento si può arrivare ad una precisione di 30 cm.
- di precisione PPP (Precise Point Positioning), che è una tecnica non differenziata per determinare con precisione le coordinate assolute di un solo ricevitore. Questa tecnica è nata per la costellazione GPS, ma può essere estesa anche a GLONASS e ad altre costellazioni GNSS.

La tecnica PPP, essendo sensibile agli effetti del segnale GNSS, può essere uno strumento per analisi dei vari *bias*.

Per le effemeridi si possono trascurare gli errori residui e si possono scrivere per ogni epoca due equazioni di codice e di fase nelle combinazioni *iono free*, per stimare 4 tipi di

parametri: le 3 coordinate X, Y, Z, l'offset d'orologio del ricevitore  $\delta_i$ , la componente umida del ritardo troposferico e le ambiguità di fase come numeri reali.

Per ottenere le precisioni centimetriche, alle equazioni di codice e di fase bisogna apportare delle correzioni  $\Delta\rho$ , che sono costituite dalla somma di vari contributi:

$$\Delta\rho^j(\mathbf{t}) = \Delta\rho^j_{\text{ECC}} + \Delta\rho^j_{\text{HW}} + \Delta\rho^j_{\text{WIN}}(\mathbf{t}) + \Delta\rho^j_{\text{REL}}(\mathbf{t}) + \Delta\rho^j_{\text{SAGN}}(\mathbf{t}) + \Delta\rho^j_{\text{TID}}(\mathbf{t}) + \Delta\rho^j_{\text{PM}}(\mathbf{t}) + \Delta\rho^j_{\text{MPHI}}(\mathbf{t}) \quad (4)$$

Con:

- $\Delta\rho^j_{\text{ECC}}$  – correzione per eccentricità tra centro di fase e centro di massa del satellite;
- $\Delta\rho^j_{\text{HW}}$  – correzioni per ritardi hardware del segnale del satellite;
- $\Delta\rho^j_{\text{WIN}}$  – correzione per l'effetto di "phase wind-up";
- $\Delta\rho^j_{\text{REL}}$  – correzione per effetti relativistici;
- $\Delta\rho^j_{\text{SAGN}}$  – correzione per effetto Sagnac legato alla rotazione terrestre;
- $\Delta\rho^j_{\text{TID}}$  - correzione per gli effetti delle maree;
- $\Delta\rho^j_{\text{PM}}$  - correzione per gli effetti del moto del polo;
- $\Delta\rho^j_{\text{MPHI}}$  - correzione per gli effetti di multipath. [18]

### 3.4.2 Il posizionamento relativo

Per il posizionamento relativo si intende quello eseguito con due o più ricevitori, che vedono contemporaneamente gli stessi satelliti, determinandone la posizione relativa, ovvero le differenze di coordinate (baseline).

La baseline è un vettore alle cui componenti unisce i due vertici, su cui stazionano contemporaneamente i due ricevitori. Per il posizionamento relativo si deve tener conto delle altezze strumentali delle antenne.

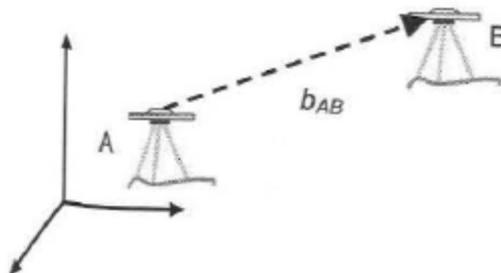


Figura 38 - Modello schematico di una baseline tra due ricevitori [18]

Il posizionamento relativo può essere fatto sia sulle misure di codice sia sulle misure di fase, ma generalmente si fa solo sulle misure di fase, perché, rispetto al pseudorange (misure di codice), sono più accurate e portano errori strumentali millimetrici.

L'equipaggiamento, per il posizionamento relativo mediante misure di codice e di fase, deve essere composto da almeno due ricevitori a singola o doppia frequenza e di un software per il post-processamento.

Il vettore base o baseline calcola la posizione di un punto B (vedi Figura 38), partendo dalle coordinate di un punto A, note, nel modo seguente:

$$\begin{aligned}\Delta X &= X_B - X_A \\ \Delta Y &= Y_B - Y_A \\ \Delta Z &= Z_B - Z_A\end{aligned}\quad (6)$$

Questo tipo di posizionamento con le misure di codice e le misure di fase può assumere la forma di posizionamento statico relativo, con sessioni lunghe di acquisizione dati o posizionamento statico rapido relativo, per distanze minori di 20 km.

Essendo delle misure effettuate con almeno due ricevitori, si possono costruire combinazioni lineari chiamate differenze, che possono essere: singole, doppie o triple, che in base ai modelli matematici basilari sono in grado di eliminare i *bias* comuni nei due ricevitori.

Con le singole differenze, in quanto i due ricevitori vedono contemporaneamente lo stesso satellite, si possono scrivere due equazioni delle misure di fase, una per ogni ricevitore, da cui si elimina il contributo di errore legato all'asincronismo dell'orologio del satellite, in quanto comune per i due ricevitori. Il vantaggio è che una buona parte delle cause degli errori sono eliminate o ridotte, però c'è lo svantaggio che si può stimare solo una posizione relativa e gli errori dell'orologio del ricevitore non può essere eliminati.

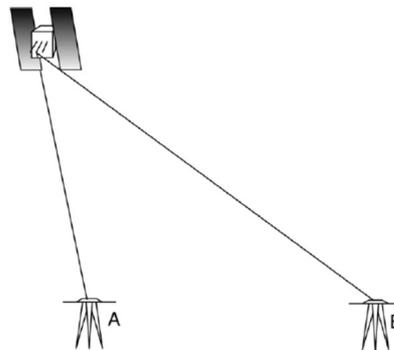


Figura 39 - Modello schematico di posizionamento relativo con le singole differenze [21]

$$\Phi_{AB}^j(t)\lambda = \frac{1}{\lambda}\rho_{AB}^j(t) - N_{AB}^j\lambda - f^j\delta_{AB}(t) + \Delta I_{AB}^j(t) + \Delta T_{jAB}^j(t) + \Delta E_{AB}^j(t) \quad (7)$$

Ove:  $\rho_{AB}^j$  – il vettore che unisce i vertici A e B;  
 $N_{AB}^j$  – vettore base contiene l'ambiguità di fase;

$\Delta I_{AB}^j$  – parte residua dei bias ionosferici;  
 $\Delta T_{jAB}^j$  – parte residua dei bias troposferici;  
 $\Delta E_{AB}^j$  - parte residua dei bias

“I bias spazialmente correlati possono essere considerati praticamente equivalenti per passi non eccedenti i 10-15 km circa, il loro residuo in questo caso si annulla e la  $\Phi_{AB}^j(t)\lambda = \frac{1}{\lambda}\rho_{AB}^j(t) - N_{AB}^j\lambda - f^j\delta_{AB}(t) + \Delta I_{AB}^j(t) + \Delta T_{jAB}^j(t) + \Delta E_{AB}^j(t)$  (7) diventa” [18]:

$$\Phi_{AB}^j(t)\lambda = \frac{1}{\lambda}\rho_{AB}^j(t) - N_{AB}^j\lambda - f^j\delta_{AB}(t) \quad (8)$$

Con le doppie differenze, i due ricevitori vedono contemporaneamente due satelliti, che hanno le stesse frequenze del segnale, si possono scrivere due equazioni alle singole differenze, in questo modo eliminandosi gli errori legati agli orologi dei ricevitori, ad eccezione della costellazione GLONASS, dove questi errori non vengono eliminati, in quanto comuni nelle due equazioni.

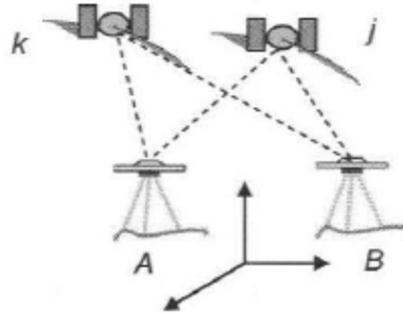


Figura 40 - Modello schematico di posizionamento relativo con le doppie differenze [18]

$$\Phi_{AB}^j(t)\lambda = \frac{1}{\lambda}\rho_{AB}^j(t) - N_{AB}^j\lambda - f^j\delta_{AB}(t) + \Delta I_{AB}^j(t) + \Delta T_{jAB}^j(t) + \Delta E_{AB}^j(t)$$

$$\Phi_{AB}^k(t)\lambda = \frac{1}{\lambda}\rho_{AB}^k(t) - N_{AB}^k\lambda - f^k\delta_{AB}(t) + \Delta I_{AB}^k(t) + \Delta T_{jAB}^k(t) + \Delta E_{AB}^k(t) \quad (9)$$

“Si assume l’ipotesi che le frequenze dei segnali sono uguali  $f^j\delta_{AB}(t) = f^k\delta_{AB}(t)$ , e sottraendo le due singole differenze si ottiene – con la stessa ipotesi, ovvero una base di lunghezza 10-15 km” [18]:

$$\Phi_{AB}^j(t)\lambda = \frac{1}{\lambda}\rho_{AB}^j(t) - N_{AB}^j\lambda \quad (10)$$

L’elaborazione delle doppie differenze ha un’accuratezza intorno ad 1 cm, in post-processamento, per il posizionamento statico a sessioni lunghe di misura e per il posizionamento statico rapido con *baseline* minori di 20 km.

Con l’elaborazione delle doppie differenze rimangono gli errori legati all’ambiguità di fase, che sono indipendenti dal tempo.

L'eliminazione degli errori legati all'ambiguità di fase si realizza con le triple differenze che, con il suggerimento di Reimondi (1984), si va a differenziare due doppie differenze in due epoche diverse.

$$\Phi_{AB}^j(t_1)\lambda = \frac{1}{\lambda}\rho_{AB}^j(t_1) - N_{AB}^j\lambda$$

$$\Phi_{AB}^j(t_2)\lambda = \frac{1}{\lambda}\rho_{AB}^j(t_2) - N_{AB}^j\lambda$$

$$\Phi_{AB}^j(t_1)\lambda - \Phi_{AB}^j(t_2)\lambda = \frac{1}{\lambda}\rho_{AB}^j(t_1) - \frac{1}{\lambda}\rho_{AB}^j(t_2) \quad (11)$$

Il posizionamento relativo può essere:

- ✓ **Posizionamento statico relativo** – dove i due ricevitori per tutto il tempo di acquisizione dati, stazionano sui vertici. Per quanto riguarda la singola differenza, il posizionamento avviene con almeno due epoche di misura, ad eccezione di GLONASS, dove, per ragioni di incognite relative ai bias in più rispetto alle altre costellazioni, si richiedono le epoche di misura in più, sufficienti per stimare le incognite in più. Per le doppie differenze, si scrivono le equazioni come descritto in precedenza, per un minimo di 4 epoche di misure e 2 satelliti. Siccome le equazioni devono essere linearmente indipendenti, si ha un satellite di riferimento e per gli altri si differenziano le misure rispetto ad esso. Come per le singole differenze, per la GLONASS c'è bisogno di più epoche di misura, in quanto le bias sono di più. Per le triple differenze, sono necessarie due epoche di misura, in quanto le incognite sono le coordinate del vertice
- ✓ **Posizionamento cinematico relativo** – è quel posizionamento relativo dove un ricevitore rimane fisso su un vertice e l'altro in movimento, con la determinazione della posizione ad ogni epoca di misura. Siccome le differenze single, doppie e triple determinano la distanza geometrica (range), in questo tipo di posizionamento saranno variabile nel tempo, quindi nelle equazioni compariranno tre incognite, relative al ricevitore mobile, per ogni epoca. Dalle incognite si elimina l'ambiguità di fase con l'operazione di inizializzazione, che consiste nel miglioramento di una posizione approssimata di codice usando le tecniche dei minimi quadrati o filtro di Kalman. Quando le coordinate del ricevitore mobile sono note rispetto ad un'epoca di riferimento, allora si possono usare anche le triple differenze, anche se in pratica sono poco usate, perché la posizione di riferimento cambia ogni epoca. Per poter eseguire il posizionamento cinematico relativo è necessario la visibilità di almeno quattro satelliti. E' molto importante determinare la posizione iniziale del ricevitore mobile, perché sarà presa come posizione di riferimento e la baseline relativa a questa posizione di partenza. Si chiamerà "*starting vector*", che viene determinata in maniera statica.

Un buon pretrattamento dei dati, che elimina i dati anomali assicura una buona soluzione con questo tipo di posizionamento.

Il trattamento dei dati è possibile in due modi: a *singola base*, il modo più usato dai software di trattamento, per i suoi buoni risultati e la sua semplicità; e a *multi-base*, essendo

un approccio più rigoroso tenendo conto della geometria globale del problema, però è poco utilizzato, in quanto pochi software sono a disposizione.

**Il posizionamento relativo singola base** – si costruiscono le singole differenze fra i file di dati per calcolare le basi, per poi decidere quali di esse considerare nel trattamento, dove la soluzione è approssimata e dedotta con pseudorange sul codice. Trattamento dati alle doppie differenze non fissa l'ambiguità, e le coordinate del vettore baseline vengono determinate con un processo iterativo. L'ambiguità di fase viene determinata per intero e sono in genere numeri interi, che andranno fissati agli interi più prossimi. "Per fare questo, il programma di calcolo ispeziona le deviazioni standard dei parametri "ambiguità" verificando che siano piccole frazioni di ciclo. Il fissaggio corretto dell'ambiguità è indicato dal fattore di qualità RATIO". [18] Con le coordinate approssimate ottenute con le singole differenze si esegue il trattamento dati con le equazioni alle differenze terze, che non necessita la conoscenza dell'ambiguità di fase iniziale per determinare le componenti del vettore baseline nel sistema di riferimento geocentrico WGS84.

**Il posizionamento relativo multi-base** – per arrivare ad una soluzione ad ambiguità fissata, le procedure sono le stesse, viste per la singola stazione, con il cambio solo della matrice disegno, assumendo la forma e la dimensione in funzione dello schema che si considera.

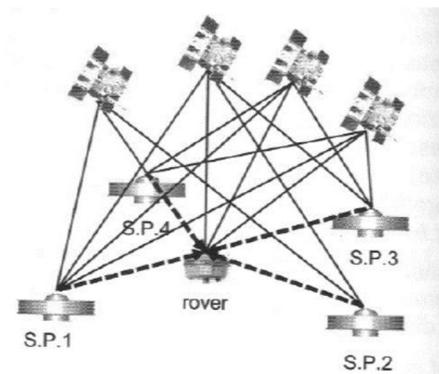


Figura 41 - Modello schematico di un posizionamento multi base [18]

$$\Phi_{AB}^{jk}(t)\lambda = \rho_{AB}^{jk}(t) - N_{AB}^{jk}\lambda + \Delta I_{AB}^{jk}(t) + \Delta T_{jAB}^k(t) + \Delta E_{AB}^{jk}(t)$$

- Ove:  $\rho_{AB}^{jk}$  – il vettore che unisce i vertici A e B;  
 $N_{AB}^{jk}$  – vettore base contiene l'ambiguità di fase;  
 $\Delta I_{AB}^{jk}$  – parte residua dei bias ionosferici;  
 $\Delta T_{jAB}^k$  – parte residua dei bias troposferici;  
 $\Delta E_{AB}^{jk}$  - parte residua dei bias [18] (6)

La (6) rappresenta l'equazione di calcolo per il posizionamento multi-stazione per le misure di fase. La (7) rappresenta l'equazione di calcolo per le misure di codice, che può essere scritta in modo analogo come per le misure di fase:

$$R_{AB}^{jk}(t) = \rho_{AB}^{jk}(t) - \Delta I_{AB}^{jk}(t) + \Delta T_{jAB}^k(t) + \Delta E_{AB}^{jk}(t) \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \rho_{AR}^{ij}}{\partial X_R} &= -\frac{X^j - X_R}{\rho_R^j} + \frac{X^i - X_R}{\rho_R^i}; \\
\frac{\partial \rho_{AB}^{ij}}{\partial Y_R} &= -\frac{Y^j - Y_R}{\rho_R^j} + \frac{Y^i - Y_R}{\rho_R^i}; \\
\frac{\partial \rho_{AB}^{ij}}{\partial Z_R} &= -\frac{Z^j - Z_R}{\rho_R^j} + \frac{Z^i - Z_R}{\rho_R^i}.
\end{aligned}
\tag{8}$$

Le equazioni (8) rappresentano i coefficienti linearizzati delle doppie differenze per il rover R. A,B sono le stazioni base.

$$(n_j - 1)(n_b + n_R - 1)n_t + 3n_b \tag{9}$$

Ove:

- $n_j$  – numero di satelliti;
- $n_b$  – numero di stazioni base;
- $n_R$  – numero di stazioni rover;

L'espressione (8) rappresenta il numero di equazioni per il posizionamento relativo multibase.

Il posizionamento multi base presenta il vantaggio che offre una soluzione finale completa senza la necessità di compensare la rete di baseline. Presenta lo svantaggio di un impegno di calcolo.

“Per il trattamento “singola base” occorre compensare la rete GPS costituita dai vettori calcolati, secondo un modello stocastico che deriva dalla loro matrice di varianza covarianza. La compensazione della rete viene effettuata con in procedimento dei minimi quadrati” [18].

I ricevitori a singola frequenza hanno un costo minore (massimo 5000 euro), ma hanno notevoli limitazioni nell'impiego: necessitano sessioni più lunghe di misura, le loro baseline hanno la massima lunghezza di 10 km, hanno minore efficienza nel posizionamento relativo statico rapido. Questi ricevitori permettono una visualizzazione grafica della posizione e della navigazione, forniscono le coordinate in vari datum, possono contenere nella memoria le cartografie, indicando la posizione dei vari punti richiesti dall'utente, ma, non permettono la memorizzazione dei dati grezzi di codice e di fase.



Figura 42 - Esempio di un ricevitore a singola frequenza [23]

I ricevitori a doppia frequenza sono più costosi rispetto a quelli mono frequenza (da 8000 a 15000 euro), oltre a ricevere il segnale su doppia frequenza, sono anche multi costellazione GNSS, possono raggiungere una precisione centimetrica, possono essere dotati

di antenna interna per GIS e navigazione e antenna esterna con la possibilità di collegamento alla rete locale GNSS tramite un modem interno, sono dotati di memoria interna, possono avere la fotocamera digitale e una bussola integrate, possono essere connessi con la tecnologia wireless, LAN e Bluetooth. Hanno il vantaggio che possono essere utilizzati anche come ricevitore statico per la post-elaborazione. I ricevitori a doppia frequenza sono i più efficienti e versatili.



*Figura 43 - Esempio di un ricevitore a doppia frequenza [23]*

Oltre ai diversi ricevitori, si utilizzano diverse antenne:

- Antenne geodetiche, che sono spesso in dotazione ai ricevitori geodetici, sono multi costellazione, in grado di ricevere i segnali da più costellazioni su diverse frequenze: L1, L2 e L5.
- Antenne a singola frequenza – con un costo compreso fra 500 e 1000 euro, in grado di ricevere il segnale su una frequenza L1, che di solito, per quanto riguarda il monitoraggio, seguono gli standard degli strumenti topografici.
- Antenne a singola frequenza – Patch. Avendo le dimensioni molto ridotte, questi tipi di antenne trovano impiego nella navigazione attraverso la telefonia cellulare e per i ricevitori a singola frequenza con precisioni ridotte (fino a qualche metro), avendo un costo ridotto.

### **3.4.3 Il posizionamento differenziale**

Con il posizionamento differenziale si intende il posizionamento con un ricevitore mobile (rover) che riceve il segnale dai satelliti GNSS e un messaggio di correzione da una stazione di posizione nota o da una rete.

Questo posizionamento può essere:

- solo codice - (DGPS) - dove è sufficiente un ricevitore di tipo palmare evoluto, in grado di ricevere le correzioni da una rete permanente o da una infrastruttura di augmentation (EGNOS) [18], ha una precisione inferiore al metro usando le correzioni di rete, offre le soluzioni in tempo reale e viene utilizzata per la navigazione di precisione, rilievi topografici di piccola/media scala, GIS;

- codice e di fase – RTK – si realizza con l’ausilio di una coppia di ricevitori geodetici a doppia frequenza, come base – rover, in collegamento fra loro tramite radio-modem, che spesso sono integrati nei ricevitori e spesso integrati da un controller palmare in cui si trova il software per il calcolo e l’archiviazione delle soluzioni [23], hanno un’accuratezza centimetrica, offrono le soluzioni in tempo reale e il rover mobile è di tipo “stop and go”. Questo tipo di posizionamento è utilizzato per i rilievi in dettaglio, topografia, catasto e il tracciamento delle opere.



Figura 44 - Esempio di ricevitore geodetico a doppia frequenza per il posizionamento RTK [23]

- Di codice e di fase – NRTK – ha una correzione proveniente da una rete, si realizza con un ricevitore geodetico a doppia frequenza, come rover e un modem telefonico GSM/GPRS (che sono spesso integrati nel ricevitore) inviando alla rete la posizione in formato NMEA e riceve le correzioni dalla rete in formato RTCM o CMR.

In tutte le tecniche GNSS di posizionamento che utilizzano oltre il codice anche la fase, risulta importante il fissaggio dell’ambiguità nelle misure di fase. In questo modo si ottengono delle soluzioni di tipo *Fixed*, con le ambiguità della misura di fase fissate su valori interi. Si possono ottenere delle soluzioni di tipo *Float*, che non hanno una precisione e un’accuratezza accettabile per un coretto posizionamento, per cui vanno scartate.

Le soluzioni nel posizionamento differenziale si possono ottenere in due modi:

1. In tempo reale – che sono delle soluzioni immediate che presentano una serie di vantaggi: non necessitano ulteriori elaborazioni, l’esito delle misure disponibile subito, accuratezza soddisfacente: però hanno anche una serie di svantaggi: hanno una ridondanza bassa, per cui i risultati non sono sempre sicuri, possono essere dei problemi nelle comunicazioni rover-base dal punto di vista delle correzioni ricevute, hanno dei costi per il collegamento telefonico quando è necessario utilizzare GSM o GPRS, hanno dei costi per le reti dinamiche.
2. In post-processamento – che sono delle soluzioni ottenute in post elaborazione, che presentano una serie di vantaggi: presentano una ridondanza alta di conseguenza una

verifica della qualità dei risultati, risultati accurati, per cui sono delle soluzioni particolarmente indicati per il monitoraggio dei fenomeni franosi, sono privi di costi e problemi di comunicazione in quanto i ricevitori non devono comunicare fra loro. Nello stesso tempo presentano degli svantaggi: hanno un tempo di elaborazione lungo con un'elaborazione in ufficio, per cui le soluzioni non sono immediate.

<b>Metodologia</b>	<b>Pro</b>	<b>Contro</b>
<b>Post-processamento</b>	Ridondanza osservazioni (verifica qualità risultati); Precisione elevata (applicazioni "esigenti" come il monitoraggio) I ricevitori non devono comunicare tra loro (assenza di costi e problemi di comunicazione).	Tempi di esecuzione lunghi Elaborazione in ufficio Soluzione non immediata (l'esito delle misure si conosce dopo l'elaborazione). A volte necessitano tempi lunghi di sessioni di acquisizioni dati.
<b>Tempo reale</b>	Tempi di esecuzione brevi (l'esito delle misure si conosce subito); Accuratezza soddisfacente, adeguata per molte applicazioni); precisioni che vanno da 2-3 cm in planimetria a 5 cm in altimetria.	Risultati non sempre sicuri, perché non c'è la possibilità di controllare il fissaggio sulle coordinate; Possibilità di problemi nelle comunicazioni base-rover o rete-rover; Costi per collegamento telefonico se si utilizza GSM o GPRS; Costi per i servizi delle reti dinamiche.

Tabella 6 - Metodologie di acquisizione dati

Le modalità delle correzioni NRTK sono:

- ✓ Virtual Reference Station (VRS) – dove l'utente trasmette la sua posizione in formato NMEA e riceve le correzioni personalizzate in formato RTCM. Queste correzioni sono relative ad una stazione virtuale che dista ad un massimo di 4 km dall'area di rilievo e vengono calcolate attraverso le interpolazioni delle stazioni circostanti alla zona dell'utente. In questo caso è necessario disporre di una comunicazione bidirezionale tra utente e centro di controllo. Il centro di controllo dispone di un software di rete che elabora in continuo i dati acquisiti da tutte le stazioni della rete e li mette a disposizione degli utenti.
- ✓ Multi Reference Station (MRS) – dove al rover viene trasmesso il messaggio (FKP - Flächen Korrektur Parameter) dalla stazione Master, per calcolare la correzione. In questo caso è necessario disporre di una comunicazione unidirezionale tra utente e centro di controllo. Il centro di controllo dispone di un modello di interpolazione lineare riferito ad una superficie parallela all'ellissoide WGS84 all'altezza della stazione di riferimento, su cui si riferiscono le coordinate dell'utente.

- ✓ Master-Auxiliary Correction Differences (MAC o MAX) – sono delle correzioni di una stazione Master che il centro di controllo manda all’utente. Il software dell’utente elabora i dati ricevuti nella maniera ritenuta più opportuna.

“Le reti GNSS statiche sono delle reti geodetiche simili a quelli tradizionali, costituite da punti materializzati sul terreno o sui manufatti, scelti in base alla visibilità e all’accessibilità dei satelliti”. [23] La soluzione di queste reti è costituita dalle coordinate dei vertici, che resta valida per anni. La rete GNSS fondamentale in Italia è la IGM95, realizzata tra 1992 e il 1997, e comprende oltre 2000 punti con un interdistanza di 20km [23]. Le monografie dei vertici sono in vendita e riportano le tre coordinate nel DATUM ETRF89, che coincide con il WGS84, e nel precedente datum Roma 40. Oltre alle monografie, sono disponibili on line le variazioni di coordinate per passare a ETRF2000.

Oltre alla rete nazionale, numerose regioni hanno realizzato dei raffittimenti della rete, portando l’interdistanza da 20 km a circa 7 km, mantenendo l’accuratezza pari a ca.5 cm [23].

Come detto in precedenza, anche le regioni di Piemonte e Lombardia hanno eseguito un raffittimento della rete nazionale di stazioni permanenti. Fino al 2014 esisteva una rete regionale per il Piemonte, che comprendeva 18 stazioni permanenti dislocate sul territorio della regione; dal 2014 con il protocollo firmato tra le regioni Piemonte e Lombardia, si è creata una sola rete di stazioni permanenti – SPIN GNSS – Servizio di posizionamento Interregionale GNSS Piemonte – Lombardia. “Il servizio fornisce i dati di correzione del posizionamento satellitare rilevati da un’infrastruttura di trenta stazioni permanenti dislocate sul territorio interregionale con la finalità di migliorare le misurazioni topografiche sul territorio e di inquadrarle nel Sistema di riferimento Geodetico nazionale ed europeo, in accordo con quanto prescritto dalle Direttiva Europea INSPIRE e dal Decreto Ministeriale del 10/11/2011. Oltre agli evidenti vantaggi legati alla gestione integrata del sistema, la rete interregionale garantisce agli utenti una maggiore omogeneità nell’inquadramento e nella precisione delle loro misure, soprattutto lungo il confine condiviso tra le due Regioni” [24].

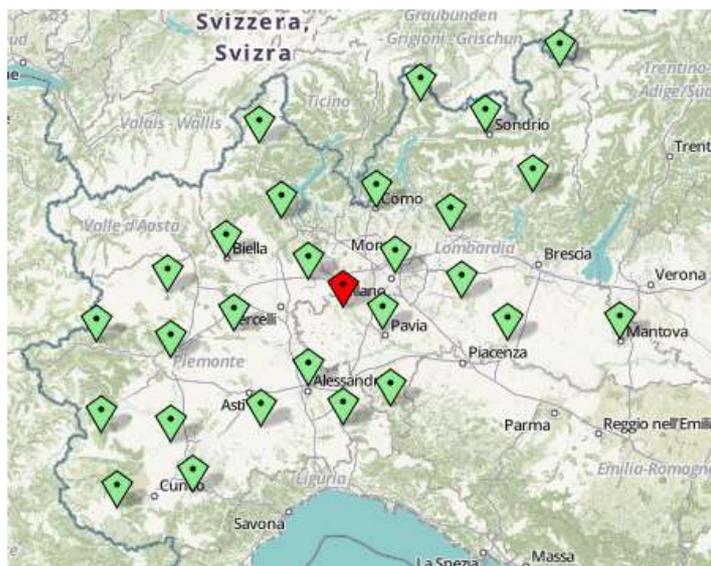


Figura 45 - Mappa delle stazioni permanenti [25]

Nella Figura 45 sono presentate le stazioni permanenti sul territorio, dove in verde sono le stazioni permanenti in grado di offrire i servizi on line; in giallo è la stazione non operativa, con la previsione di tornare operativa in futuro; in rosso è presentata la stazione permanente in fase di ripristino.

I servizi offerti all'utenza della rete di stazioni permanenti sono:

- Le correzioni in tempo reale (RTK della rete) (Tabella 7) – con una precisione di 2-3-cm in planimetria e inferiore a 5 cm per altimetria. Questa precisione può variare a seconda del tipo di ricevitore e delle condizioni in campagna durante il rilievo. Il sistema di riferimento per i servizi in tempo reale è il ETRF 2000 – sistema di riferimento Geodetico Nazionale – Rete Dinamica nazionale. I formati per le correzioni in tempo reale sono RTCM2, RTCM3, che sono dei formati standard per la trasmissione di dati GPS/GLONASS, o CMR/CMR+ che è un formato sviluppato da Trimble utilizzato soprattutto dai ricevitori per l'agricoltura di precisione. Per poter ricevere le correzioni in tempo reale, è necessario impostare sul ricevitore l'invio alla rete del messaggio NMEA GGA.

Servizio	Formato di trasmissione
MAC RTCM 3.x	RTCM 3
VRS RTCM 3.x	RTCM 3
VRS RTCM 2.3	RTCM 2.3
VRS CMR	CMR
VRS CMR+	CMR+
iMAX RTCM 3.x	RTCM 3
FKP RTCM 2.3	RTCM 2.3
NRT RTCM 3.x	RTCM

Tabella 7 – SPINGNSS - Servizi in tempo reale (RTK di rete) [25]

- Le correzioni in post-elaborazione (Tabella 8)– con una precisione teorica di 1-2-cm sia in planimetria che in altimetria per sessioni di misura di 10-15 min. e una distanza dalla stazione di riferimento di 10 km. Anche questa precisione può subire le variazioni di precisione a seconda del tipo di ricevitore usato, del tipo di software utilizzato nella fase di post-processamento dati, del tempo di acquisizione dati e delle condizioni in campagna durante il rilievo. I file per le correzioni sono in formato RINEX e VIRTUAL RINEX, che si possono scaricare dall'utenza collegandosi al sito [www. SPINGNSS.it](http://www.SPINGNSS.it), usando dei parametri: username e password, che sono scelti dall'utenza in fase di registrazione. Il sistema di riferimento usato è quello Geodetico Nazionale ETRF2000 – Rete Dinamica Nazionale. L'utente deve disporre di un ricevitore GPS/GNSS abilitato al salvataggio dei dati in formato RINEX o altro formato proprietario e di un software per la post-elaborazione dei dati GPS/GNSS.

Servizio	Tecnica	Formato
RINEX	Post Processamento di dati con file RINEX	RINEX 2.11
RINEX Virtuale	Post Processamento di dati con RINEX Virtuale	RINEX 2.11

Tabella 8 - SPINGNSS - Servizi in post-processamento [25]

Le modalità di trasmissione delle correzioni al rover sono:

- ✓ Radio modem – quando le distanze fra il centro di controllo e l'utente sono brevi.
- ✓ Modem GSM – la stazione master è dotata di un router che consente accessi multipli, dove l'utente si può connettere per ricevere le correzioni. Questa modalità presenta il vantaggio di avere una buona affidabilità del collegamento diretto, ma anche degli svantaggi: costi telefonici, numeri limitati di connessioni, aree non coperte da GSM.
- ✓ Internet (protocollo Ntrip) – è stato elaborato dall'ufficio cartografico della Repubblica Tedesca Francoforte in accordo con la statunitense RTCM che dal 2004 diffonde i dati GNSS, ovvero le correzioni di codice e di fase in formato RTCM, in tutto il mondo, mediante trasmissione continua del flusso di dati (data stream), e viene accettato come standard. Questo sistema ha come componenti software: Ntrip server, un modulo che trascrive i dati RTCM nel protocollo NTRIP inviandoli al *caster*; Ntrip caster, un modulo di tipo Internet Radio, che riceve i dati da uno o più Ntrip server e, via internet, li mette a disposizione a Ntrip client, che a sua volta, con il collegamento al *caster*, riceve la correzione passandola al software del rover per il calcolo della correzione NRTK (coordinate).

Tutti questi tipi di posizionamento possono essere impiegati nel monitoraggio dei fenomeni franosi, con le dovute cautele, come ad esempio: per un fenomeno in rapida evoluzione, si deve tenere conto di possibilità di perdita della strumentazione nel caso di un crollo. Per le frane complesse, multidirezionali, queste tecniche di posizionamento vanno bene anche perché c'è la possibilità di monitoraggio con più ricevitori, in diversi punti critici della frana e c'è anche la possibilità di monitoraggio continuo dei punti non facili da raggiungere, es. le grandi pendenze.

# Capitolo 4

## Caso studio

### 4.1 Descrizione geografica e fisica della frana di Montaguto

L'obiettivo della tesi è quello di cercare una correlazione fra tipologie di frane con strumenti GNSS di monitoraggio. Al fine di individuare dei range di spostamenti "reali" e verosimili, si è analizzata una reale frana monitorata, in cui erano disponibili tantissime serie storiche. Da questi dati si è cercato di estrarre delle classi di velocità tipo, al fine di poterle riprodurre in laboratorio. Nello specifico, è stata analizzata la frana di Montaguto, che si trova nella Regione di Campania, nel comune di Montaguto. Questa frana si trova nella valle del fiume Cervaro (in sinistra idrografica) e la sua evoluzione ha in passato interrotto sia la strada statale 90, che collega Foggia ad Avellino, che la tratta ferroviaria da Benevento a Foggia, tratta indispensabile per garantire il collegamento Napoli – Bari.

Si tratta di una frana di grandi dimensioni, con una lunghezza approssimativa di 3,1 Km, un'area di  $6,6 \times 10^5 \text{ m}^2$ , e complessa dal punto di vista temporale e spaziale, con periodi di attività particolarmente intensi e con spostamenti multidirezionali.

Di seguito sono riportate varie foto aeree, dove si evidenzia l'attività della frana. In Figura 47 è presentata la foto aerea della frana scattata il 27 aprile 2006 e nella Figura 48 la foto aerea del 3 aprile 2010. Il confronto di queste 2 foto aeree evidenzia l'attività della frana specialmente al piede.

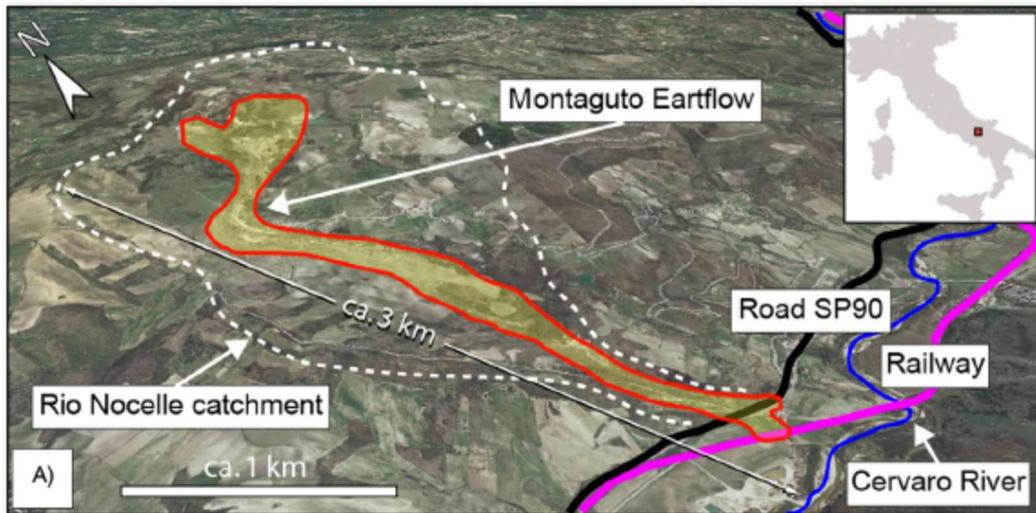


Figura 46 - Localizzazione della frana di Montaguto [26]



Figura 47 - Foto aerea del piede della frana di Montaguto - 27 aprile 2006 [27]



*Figura 48 - Foto del piede della frana di Montaguto - 3 aprile 2010 [27]*

## **4.2 Serie storiche del monitoraggio della frana di Montaguto**

Dal materiale fornito dal CNR, si evidenzia l'attività della del versante in frana molto lunga e complessa. Partendo dal 1954 il CNR IRPI ha cercato di identificare gli eventi maggiormente significativi utilizzando le fotografie aeree disponibili. Sulla base delle informazioni raccolte è stato possibile ricostruire la seguente successione di eventi:

- dal 1954 al 1976 – si sono riscontrati movimenti in direzione SE con la formazione di nuovi depositi, in particolare negli anni 1954, 1955 e 1958;
- dal 1976 al 1991 – periodo caratterizzato da una relativa stabilità della frana, cioè con cambiamenti molto piccoli;
- dal 1991 al 2003 – i residenti della zona indicano dei movimenti molto lenti;
- dal 2004 al 2005 – i residenti della zona indicano dei movimenti lenti in primavera e probabilmente anche in estate del 2004;
- dal 2005 al 2006 – la frana è molto attiva, avanzando di 700 m, conducendo anche alla chiusura della strada statale 90 per 3 mesi;
- dal dicembre 2006 all'ottobre 2007– la frana è molto attiva, con movimenti concentrati sul piede;
- dal 2008 al giugno 2009 – periodo caratterizzato da piccoli movimenti;
- dal luglio 2009 al marzo 2010 – periodo caratterizzato da un'attività intensa dell'intera frana;
- da aprile 2010 sono stati registrati movimenti anche di 5m al giorno, causando l'interruzione della ferrovia e della strada statale 90.

Il monitoraggio intensivo della frana di Montaguto è cominciato nel 2010 con l'installazione di una serie di strumenti di monitoraggio. Al fine di recuperare anche l'evoluzione pregressa del versante, è stata inoltre condotta un'analisi dei dati storici disponibili.

#### 4.2.1 Analisi dei dati storici

Al fine di recuperare lo storico dell'evoluzione del versante, sono stati raccolti e analizzati tutti i dati disponibili nell'intervallo temporale 1954 – 2007. In tale intervallo, l'area della frana di Montaguto è stata caratterizzata da una sequenza di periodi in cui si è registrata l'attivazione di fenomeni franosi e periodi in cui sono state riscontrate condizioni di relativa stabilità. Per lo studio di questo intervallo sono state impiegate immagini satellitari e foto aeree dell'area indagata scattate con una frequenza annuale o multi-annuale. Dal confronto di una foto con quelle precedenti si può osservare l'eventuale attività dell'area indagata e riconoscere la presenza di eventuali fenomeni franosi.

Questo tipo di analisi a lungo termine si basa su dati che coprono più anni o decenni e ha come finalità la caratterizzazione geomorfologica della singola frana o di gruppi di frane eventualmente presenti nella stessa area di interesse.

Le prime foto aeree disponibili per l'intero territorio nazionale sono relative al volo GAI del 1954.

Le tecniche utilizzate per l'analisi nel lungo periodo utilizzate per la frana di Montaguto sono:

- immagini satellitari, valide da tre decenni, sono delle foto provenienti dai satelliti, scattate nei diversi periodi (frequenza annuale o multi-annuale), che, messi a confronto, evidenziano l'attività della frana;
- analisi visuale dalle foto aeree, ovvero, sono acquisiti due set di foto aeree che coprono il periodo 1985-1990 che sono messe a confronto con delle foto aeree esistenti, datate 1939, 1940, 2000, in questo modo potendosi osservare l'attività della frana;

A partire da questi dati, sono state realizzate delle carte geomorfologiche che coprono periodi da qualche anno fino a qualche decennio.

Nella tabella successiva sono presentati i vari tipi di dati di monitoraggio disponibili dell'area interessata del fenomeno franoso Montaguto nei vari periodi, dove la scala è quella del fotogramma o della rappresentazione.

<b>Tipo di dati disponibili</b>	<b>Scala</b>	<b>Anno</b>
Carte topografiche	1:25000	1954
Foto aeree	1:33000	1954
Foto aeree	1:13500	1976
Foto aeree	1:13000	2003
Ortofoto	1:10000	2005
Mappe topografiche	1:5000	2006

*Tabella 9 - Tipi di dati disponibili per la frana di Montaguto*

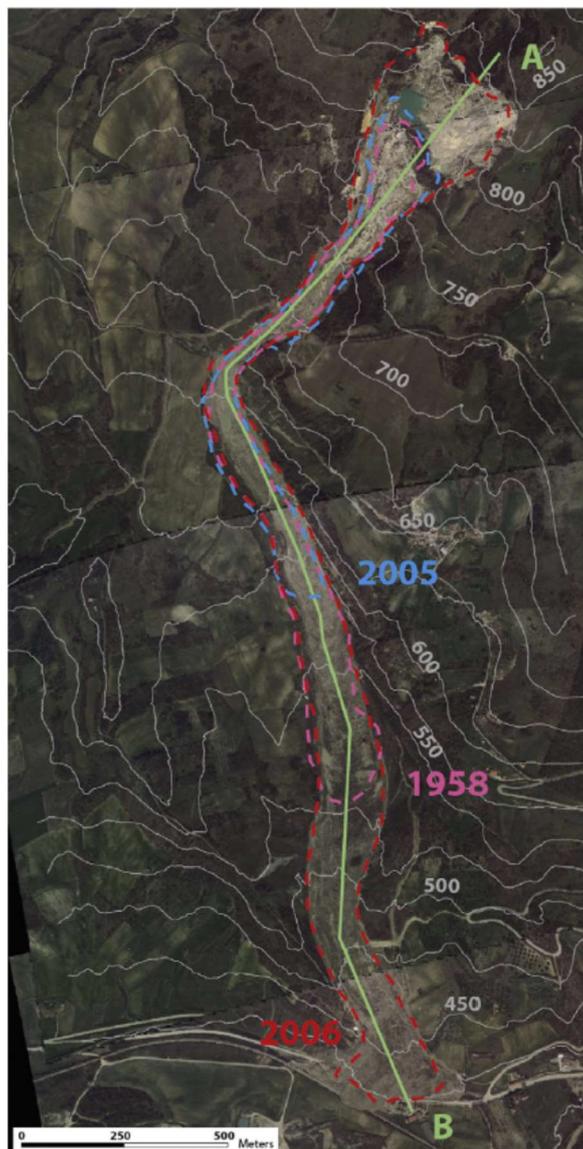


Figura 49 - Foto aerea con carta topografica dell'area della frana, con indicazioni delle varie zone di propagazione nel periodo compreso tra 1958 e 2006 [28]

#### 4.2.2 Monitoraggio a breve termine

L'evoluzione recente della frana di Montaguto ha determinato una condizione di emergenza che ha richiesto l'impiego di tecniche di monitoraggi caratterizzate da un'alta frequenza di campionamento (monitoraggio a breve termine).

Il monitoraggio a breve termine si basa sui dati acquisiti da sistemi che hanno delle frequenze di acquisizione orarie e che permettono uno studio dettagliato dell'evoluzione del fenomeno.

Il monitoraggio a breve termine si è avvalso dei seguenti sistemi:

- GDInSAR
- RTS

A queste tecniche di campionamento ad alta frequenza sono state abbinate anche delle indagini di tipo areale effettuate utilizzando dati LiDAR e DInSAR.

### **4.3 Analisi dei dati di monitoraggio**

#### **4.3.1. Presentazione generale della rete di monitoraggio della frana di Montaguto**

A partire da fine aprile 2010, è stata progressivamente implementata una rete di monitoraggio topografico costituita da 3 stazioni totali robotizzate per monitoraggio topografico. Tali stazioni hanno permesso di acquisire dati su caposaldi installati su tutto il corpo frana che ha uno sviluppo di circa 3 Km. Nella presente tesi, verranno utilizzati i dati relativi al periodo 11 giugno – 31 dicembre 2010.

La prima stazione robotizzata – RTs1 è una Topcon IS 201, con una precisione del dato acquisito, che arriva a 2mm+2 ppm. La rete topografica è costituita da 3 prismi fissi e altri 19 prismi in corpo frana, con una distanza tra essi compresa tra 113 m e 430 m. La frequenza di campionamento è compresa di un'ora di giorno e di 4 ore di notte. Questa stazione è stata installata nel 29 aprile 2010, ad un'altezza ellissoidica di 750m. Ha in dotazione una telecamera di 1,3 Mpixel.

RTs1 è posizionata nella parte alta della frana e ha come obiettivo il monitoraggio della testata della frana – vedi Figura 50.

La seconda stazione robotizzata – RTs2 – è una Leica TCA 1800, con una precisione del dato acquisito, che arriva a 1 mm+2 ppm. La rete topografica è costituita da 4 prismi fissi e altri 15 prismi in corpo frana, con una distanza tra essi compresa tra 148m e 1008m. La frequenza di campionamento è di 2 ore. Questa stazione è stata installata nel 9 giugno 2010 ad un'altezza ellissoidica di 670m e non ha in dotazione la telecamera.

RTs 2 è posizionata nel settore mediano della frana e ha come obiettivo il monitoraggio il corpo della frana – vedi Figura 50.

La terza stazione robotizzata – RTs3 – utilizza Leica TCA 3200, con una precisione del dato acquisito, che arriva a 1mm+1 ppm. La rete topografica è costituita da 2 prismi fissi e altri 20 altri prismi in corpo frana, con una distanza da essi compresa tra 62m e 320m. La frequenza di campionamento è compresa di un'ora di giorno e di e di 3 ore di notte. Questa stazione è stata installata nel 30 aprile 2010 ad un'altezza ellissoidica di 410 m e non è dotata di telecamera.

RTs 3 è posizionata nella parte bassa della frana e ha come obiettivo il monitoraggio del piede della frana.

Oltre alle 3 RTs, l'Università di Firenze installò un GbinSAR per effettuare anche un monitoraggio di tipo reale.

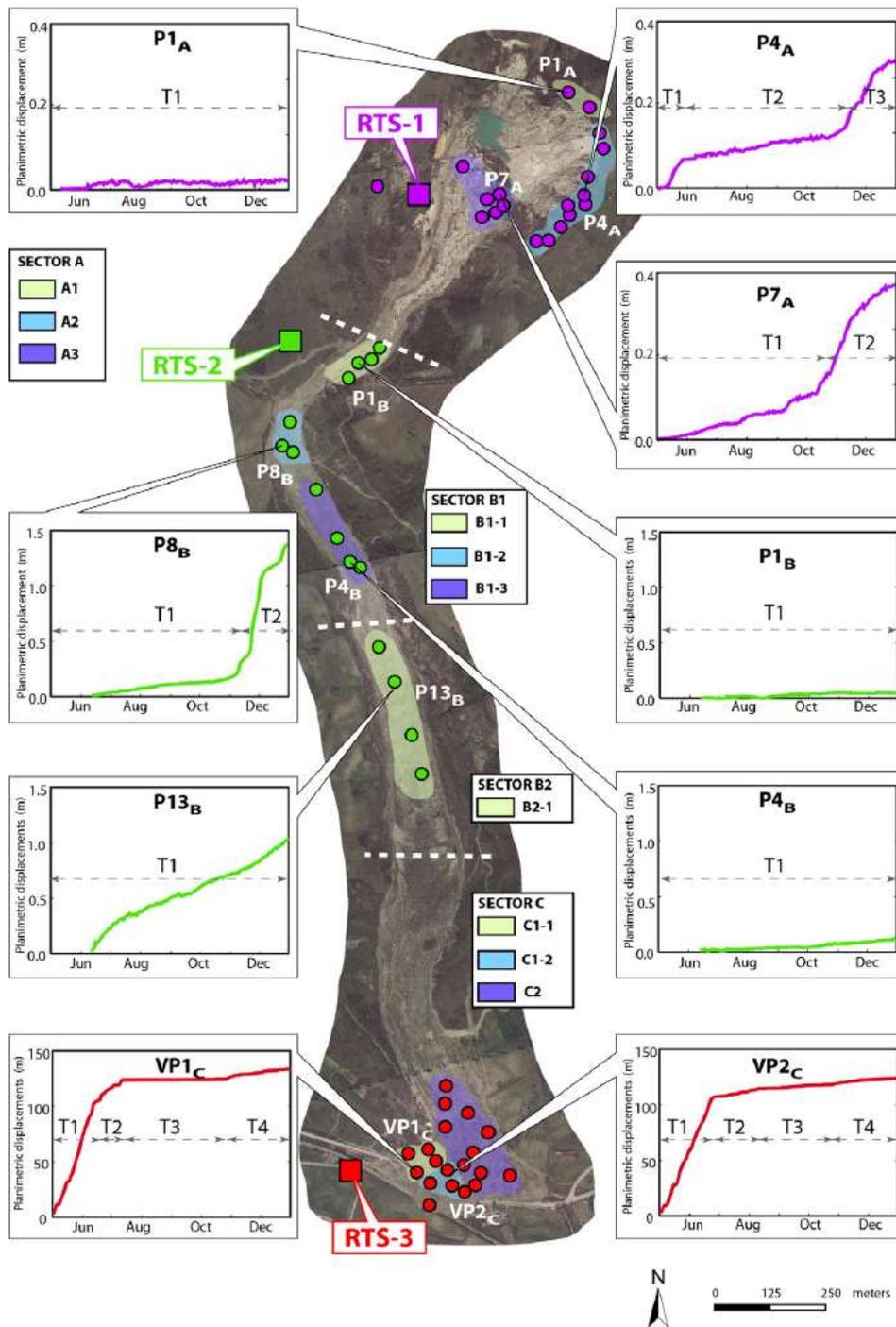


Figura 50 - Posizionamento delle RTs con vari prismi [26]

Insieme alle descrizioni, sono stati forniti dal CNR, in formato excel, i dati acquisiti con le tre RTs.

Dall'analisi della Figura 50 e dai files excel forniti dal CNR si può osservare:

- Per la testata della frana sono stati installati i prismi 1<sub>A</sub>, 4<sub>A</sub>, 7<sub>A</sub>, per cui è stato fornito dal CNR un file excel, dove sono riportati i dati acquisiti nel periodo 18 giugno 2010 – 31 dicembre 2010.
- Per il prisma 1<sub>A</sub>, sono presenti 837 cicli di acquisizioni dati, con una frequenza media di 3 ore, dove sono presenti grosse fasce di discontinuità, che variano da 10 ore fino ad un massimo di 120 ore, per un totale di 152, per cui il trattamento dei dati diventa difficile, se non impossibile, dato che non si conoscono i motivi della presenza di queste fasce.
- Per il prisma 4<sub>A</sub>, sono presenti 831 cicli di acquisizioni dati, con una frequenza che varia da 10 min ad un'ora. Anche in questo caso sono presenti grosse fasce di discontinuità di natura sconosciuta, che variano da 10 ore a 120 ore, per un totale di 160 fasce, per cui, anche in questo caso, è difficile, se non impossibile, fare il trattamento dei dati.
- Per il prisma 7<sub>A</sub>, sono presenti 831 cicli di acquisizioni dati, con una frequenza media di un'ora, dove è presente lo stesso problema come per i prismi precedenti, per cui è impossibile fare il trattamento dati.
- Per il piede della frana sono stati installati dei pseudoprismi VP1<sub>C</sub>, VP2<sub>C</sub>, per monitorare gli spostamenti est e ovest. I dati sono stati acquisiti con una frequenza media di un'ora, per un periodo di 4 ore ogni giorno. Questi dati non hanno continuità e quindi sono poco rilevanti.
- Per il corpo frana sono stati installati i prismi 1<sub>B</sub>, 4<sub>B</sub>, 8<sub>B</sub>, 13<sub>B</sub>, per cui è stato fornito dal CNR un file excel, dove sono riportati i dati acquisiti nel periodo 11 giugno 2010 – 31 dicembre 2010, con una frequenza di 2 ore. Anche in questo file sono presenti delle discontinuità, che variano da 12 ore a 20 ore, però la frequenza di esse è minore, per cui il trattamento dati può essere effettuato senza grosse difficoltà.

#### **4.3.2 Trattamento dei dati forniti**

Dal confronto dei vari RTs fatto in precedenza, si è arrivato alla conclusione che il trattamento dei dati forniti da CNR si può fare per i prismi posizionati nel corpo frana, vale a dire, per i prismi 1<sub>B</sub>, 4<sub>B</sub>, 8<sub>B</sub>, 13<sub>B</sub>, per cui CNR ha fornito i dati acquisiti nel periodo indicato in precedenza.

I dati riguardando il periodo che va dal 11 giugno 2010 ore 14.00 al 31 dicembre 2010 ore 24.00, con una frequenza di 2 ore. In alcuni casi, la frequenza di acquisizione dei dati può variare da un minimo di 50 minuti ad un massimo di 4,5 ore.

Anche questa acquisizione dati presenta delle discontinuità, che variano da 12 ore a 28 ore. Queste discontinuità hanno una natura sconosciuta e vanno eliminate, creandosi in questo modo delle fasce di campionamento da una discontinuità all'altra:

- per il prisma 1<sub>B</sub> sono state individuate 18 fasce di campionamento;
- per il prisma 4<sub>B</sub> sono state individuate 18 fasce di campionamento;
- per il prisma 8<sub>B</sub> sono state individuate 88 fasce di campionamento;
- per il prisma 13<sub>B</sub> sono state individuate 25 fasce di campionamento.

Le tabelle contengono delle coordinate in RAW data – che sono dei dati relativi alle coordinate, in corrispondenza di una serie sequenziale che rappresenta l’anno, mese, giorno l’ora - e gli spostamenti cumulati Raw, in latitudine (x), longitudine (y) e in altitudine (z). Da questi files di acquisizione dati si è proceduto al calcolo degli spostamenti su base giornaliera, mensile, cumulati giornalieri e cumulati mensili nelle tre direzioni x, y e z, con lo scopo di individuare, in base alla classificazione fatta da Varnes nel 1978 - Figura 51, la classe di velocità per gli spostamenti di ogni prisma.

Velocity Class	Description	Velocity (mm/sec)	Typical Velocity	Probable Destructive Significance
7	Extremely Rapid	$5 \times 10^3$	5 m/sec	Catastrophe of major violence; buildings destroyed by impact of displaced material; many deaths; escape unlikely
6	Very Rapid	$5 \times 10^1$	3 m/min	Some lives lost; velocity too great to permit all persons to escape
5	Rapid	$5 \times 10^{-1}$	1.8 m/hr	Escape evacuation possible; structures; possessions, and equipment destroyed
4	Moderate	$5 \times 10^{-3}$	13 m/month	Some temporary and insensitive structures can be temporarily maintained
3	Slow	$5 \times 10^{-5}$	1.6 m/year	Remedial construction can be undertaken during movement; insensitive structures can be maintained with frequent maintenance work if total movement is not large during a particular acceleration phase
2	Very Slow	$5 \times 10^{-7}$	15 mm/year	Some permanent structures undamaged by movement
	Extremely SLOW			Imperceptible without instruments; construction POSSIBLE WITH PRECAUTIONS

Figura 51- Classificazione delle frane in funzione della velocità (Cruden & Varnes, 1996)

In primis, per ogni mese si è individuato il numero effettivo di giorni di acquisizione dati.

Dopo l’individuazione delle fasce di campionamento, si è calcolato lo spostamento cumulato minimo e massimo per ogni fascia di campionamento per ogni prisma. A seguire, questi spostamenti cumulati, calcolati in base alle fasce di campionamento, sono raggruppati per mesi di acquisizione dati, ottenendosi dei minimi e massimi spostamenti mensili cumulati e gli spostamenti mensili minimi e massimi. Nelle tabelle a seguire sono presentati i dati ottenuti per gli spostamenti mensili e mensili cumulati nei valori minimi e massimi per ogni prisma e degli spostamenti giornalieri e giornalieri cumulati nei valori minimi e massimi per ogni prisma in analisi. In base al numero effettivo di giorni di acquisizione dati e in base agli spostamenti ottenuti si è calcolato anche le velocità istantanee minime e massime per ogni prisma, su base mensile e, nella Tabella 19, sono raggruppate le velocità istantanee minime e massime per ogni prisma presa nell’analisi.

Il numero effettivo di giorni di acquisizione dati – come da Tabella 10 - è stabilito in base alle fasce di discontinuità, trovate nei dati forniti dal CNR; questo numero è stato raggruppato per mesi di acquisizione.

Mese	Prisma1 <sub>B</sub>	Prisma4 <sub>B</sub>	Prisma8 <sub>B</sub>	Prisma13 <sub>B</sub>
Giugno	20	20	20	18
Luglio	22	22	31	21
Agosto	31	31	31	30
Settembre	25	25	27	13
Ottobre	26	26	25	22
Novembre	30	30	30	24
Dicembre	30	30	30	26
Totale	184	184	194	154

Tabella 10 - Numero di giorni effettivi di acquisizione dati per ogni prisma

Nel presente capitolo, si presenta il calcolo effettuato per il prisma 1<sub>B</sub> e nell'appendice, si presenta il calcolo effettuato per tutti gli altri prismi presi nell'analisi.

Nel calcolo sono presentati i calcoli effettuati per stabilire: gli spostamenti mensili cumulati e gli spostamenti mensili, con i risultati presentati nella Tabella 11. Nei grafici Figura 52 e Figura 53 sono rappresentati gli andamenti mensili degli spostamenti mensili cumulati e mensili.

Nr. Prisma	Periodo (mese)	Spostamenti mensili cumulati(m)			Spostamenti mensili (m)		
		Dx	Dy	Dz	Dx	Dy	Dz
<b>1<sub>B</sub></b>	Giugno	0,002	0,002	0,008	0,002	0,002	0,008
	Luglio	0,900	2,161	0,051	0,897	2,159	0,043
	Agosto	0,895	2,125	0,091	0,005	0,036	0,040
	Settembre	0,889	2,113	0,090	0,006	0,012	0,001
	Ottobre	0,885	2,097	0,098	0,004	0,016	0,008
	Novembre	0,882	2,100	0,094	0,003	0,003	0,004
	Dicembre	0,878	2,100	0,094	0,004	0,000	0,001

Tabella 11 - Spostamenti mensili cumulati e mensili per il prisma 1<sub>B</sub>

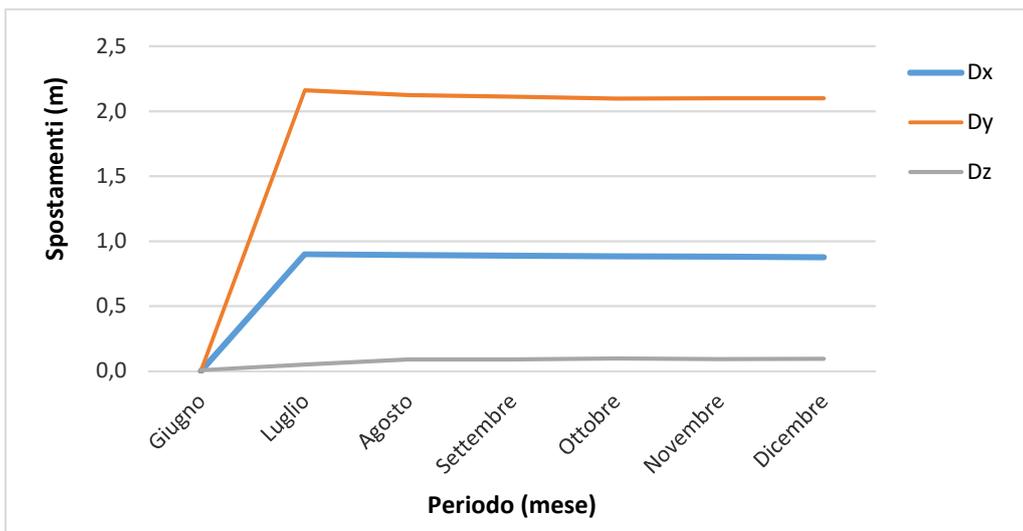


Figura 52 - Spostamenti mensili cumulati per il prisma 1<sub>B</sub>

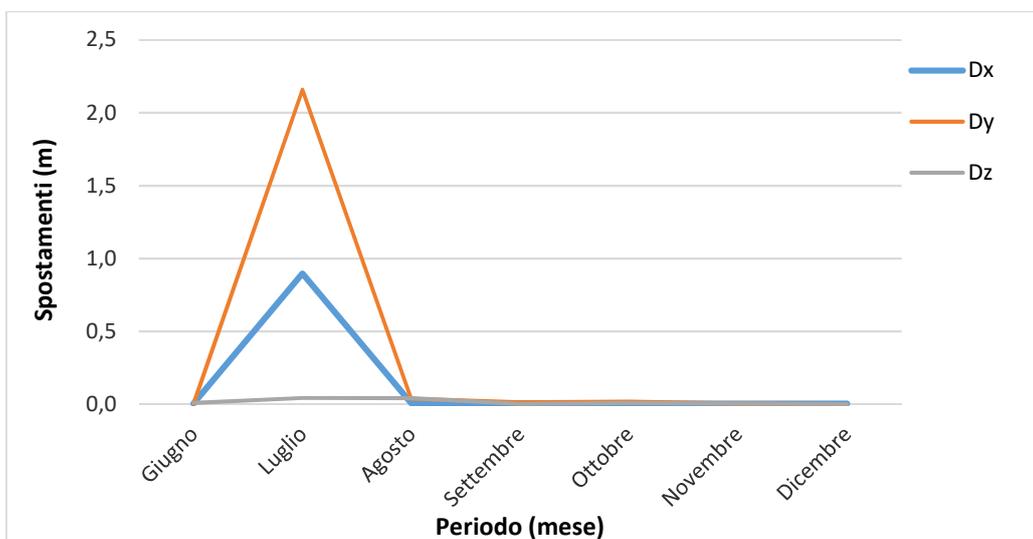


Figura 53 - Spostamenti mensili per il prisma 1<sub>B</sub>

I risultati per gli spostamenti giornalieri e giornalieri cumulati, sono presentati nella Tabella 12. Nei grafici Figura 54 e Figura 55 sono rappresentati gli andamenti mensili per gli spostamenti giornalieri cumulati e giornalieri.

Nr. Prisma	Periodo (mese)	Spostamenti giornalieri cumulati(m)			Spostamenti giornalieri (m)		
		Dx	Dy	Dz	Dx	Dy	Dz
1 <sub>B</sub>	Giugno	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Luglio	0,021	0,051	0,001	0,041	0,098	0,002
	Agosto	0,012	0,029	0,001	0,000	0,001	0,001
	Settembre	0,009	0,022	0,001	0,000	0,000	0,000
	Ottobre	0,007	0,017	0,001	0,000	0,001	0,000
	Novembre	0,006	0,014	0,001	0,000	0,000	0,000
	Dicembre	0,005	0,011	0,001	0,000	0,000	0,000

Tabella 12 - Spostamenti giornalieri cumulati e giornalieri per il prisma 1<sub>B</sub>

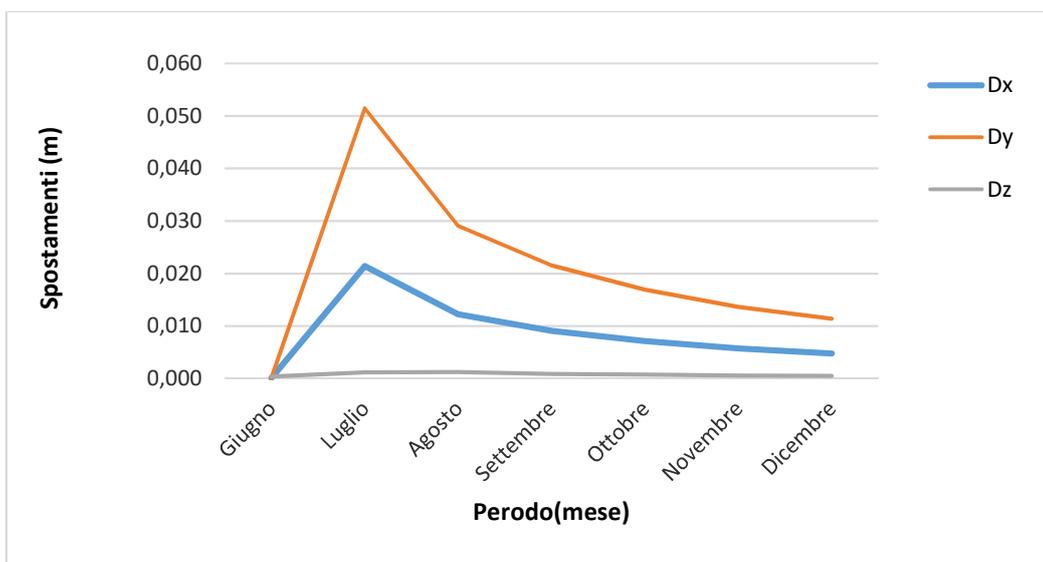


Figura 54 – Spostamenti giornalieri cumulati per il prisma 1<sub>B</sub>

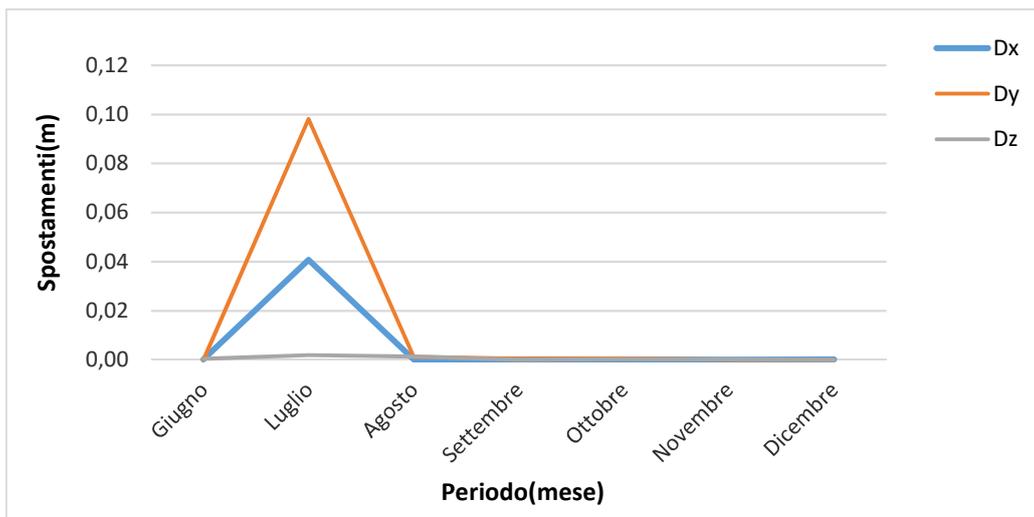


Figura 55– Spostamenti giornalieri per il prisma 1<sub>B</sub>

Nella Tabella 13 sono presentate le velocità istantanee nei valori minimi e massimi e nei grafici Figura 56 e Figura 57 sono rappresentati gli andamenti mensili per le velocità istantanee nei valori minimi e massimi.

Nr. prisma	Mese	Velocità istantanee (m/s) minime			Velocità istantanee (m/s) massime		
		Vx	Vy	Vz	Vx	Vy	Vz
1 <sub>B</sub>	Giugno	0,000	4,96E-09	0,000	0,000	0,000	0,001
	Luglio	0,000	3,18E-08	0,000	0,004	0,010	0,000
	Agosto	0,000	4,70E-09	0,000	0,000	0,000	0,000
	Settembre	0,000	5,74E-08	0,000	0,000	0,000	0,000
	Ottobre	0,000	1,18E-08	0,000	0,000	0,000	0,000
	Novembre	0,000	5,14E-09	0,000	0,000	0,000	0,000
	Dicembre	0,000	1,03E-07	0,000	0,000	0,000	0,001

Tabella 13– Velocità istantanee minime e massime per il prisma 1<sub>B</sub>

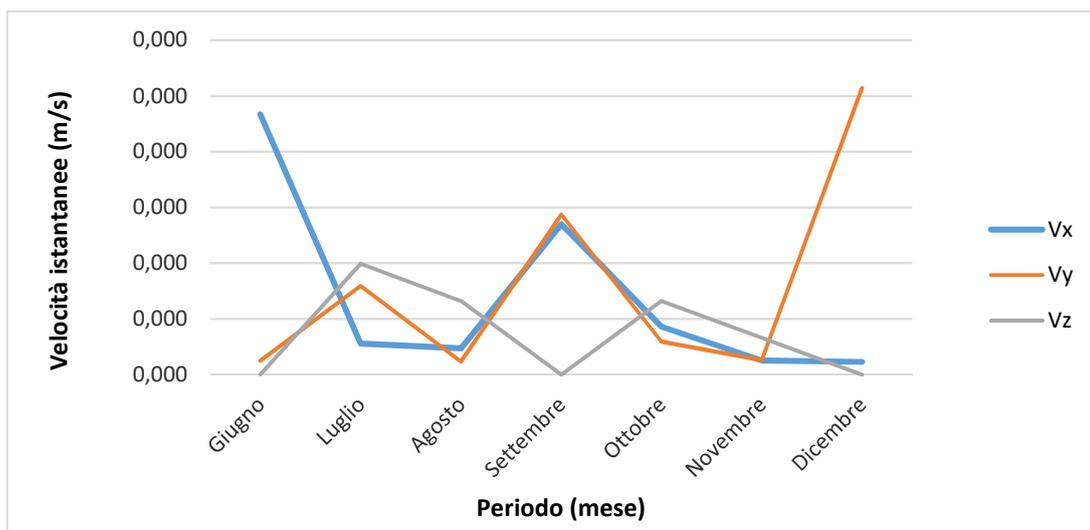


Figura 56 – Velocità istantanee minime per il prisma 1<sub>B</sub>

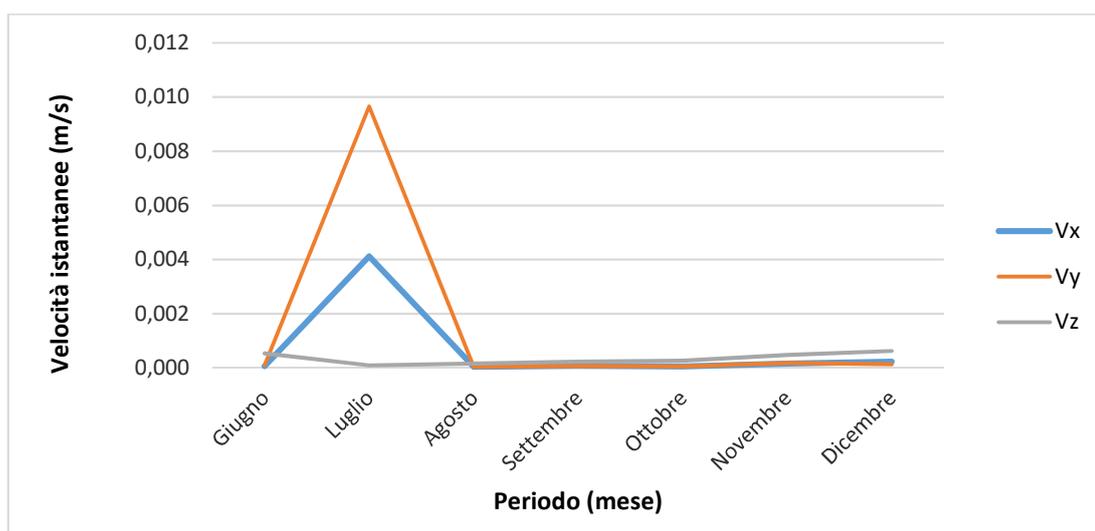


Figura 57– Velocità istantanee massime per il prisma 1<sub>B</sub>

Dopo il calcolo degli spostamenti e le velocità istantanee per tutti i prismi presi nell'analisi, si è proceduto con il raggruppamento per i valori minimi e massimi totali per ogni prisma degli spostamenti e delle velocità istantanee, i valori essendo presentati nelle successive tabelle: Tabella 14, Tabella 15, Tabella 16, Tabella 17, Tabella 18, Tabella 19, dove si può facilmente osservare il fatto che la frana di Montaguto presenta degli spostamenti in tutte e tre direzioni, ovvero  $D_x$ ,  $D_y$  – in planimetria e  $D_z$  – in altimetria, essendo complessi anche dal punto di vista temporale, quindi si tratta di una frana complessa dal punto di vista temporale e spaziale.

<b>Nr. Prisma</b>	<b>Spostamenti mensili cumulati(m) minimi</b>			<b>Spostamenti mensili (m) minimi</b>		
	<b>Dx</b>	<b>Dy</b>	<b>Dz</b>	<b>Dx</b>	<b>Dy</b>	<b>Dz</b>
<b>1<sub>B</sub></b>	0,002	0,002	0,008	0,002	0,000	0,001
<b>4<sub>B</sub></b>	0,009	0,017	0,023	0,001	0,017	0,006
<b>8<sub>B</sub></b>	0,022	0,014	0,002	0,001	0,014	0,002
<b>13<sub>B</sub></b>	0,124	0,209	0,041	0,011	0,077	0,000

Tabella 14 – Risultati degli spostamenti per ogni prisma, ottenuti dai files di acquisizione dati

<b>Nr. Prisma</b>	<b>Spostamenti mensili cumulati(m) massimi</b>			<b>Spostamenti mensili (m) massimi</b>		
	<b>Dx</b>	<b>Dy</b>	<b>Dz</b>	<b>Dx</b>	<b>Dy</b>	<b>Dz</b>
<b>1<sub>B</sub></b>	0,900	2,161	0,098	0,897	2,159	0,043
<b>4<sub>B</sub></b>	5,281	13,622	3,408	3,729	7,633	3,349
<b>8<sub>B</sub></b>	0,794	1,233	0,013	0,473	0,734	0,013
<b>13<sub>B</sub></b>	4,098	8,703	0,192	3,916	7,656	0,097

Tabella 15 – Risultati degli spostamenti per ogni prisma, ottenuti dai files di acquisizione dati

<b>Nr. Prisma</b>	<b>Spostamenti giornalieri cumulati (m) minimi</b>			<b>Spostamenti giornalieri (m) minimi</b>		
	<b>Dx</b>	<b>Dy</b>	<b>Dz</b>	<b>Dx</b>	<b>Dy</b>	<b>Dz</b>
<b>1<sub>B</sub></b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>4<sub>B</sub></b>	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000
<b>8<sub>B</sub></b>	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000
<b>13<sub>B</sub></b>	0,007	0,012	0,001	0,001	0,005	0,000

Tabella 16 – Risultati degli spostamenti per ogni prisma, ottenuti dai files di acquisizione dati

<b>Nr. Prisma</b>	<b>Spostamenti giornalieri cumulati (m) massimi</b>			<b>Spostamenti giornalieri (m) massimi</b>		
	<b>Dx</b>	<b>Dy</b>	<b>Dz</b>	<b>Dx</b>	<b>Dy</b>	<b>Dz</b>
<b>1<sub>B</sub></b>	0,021	0,051	0,001	0,041	0,098	0,002
<b>4<sub>B</sub></b>	0,211	0,545	0,136	0,149	0,305	0,134
<b>8<sub>B</sub></b>	0,004	0,006	0,001	0,016	0,024	0,001
<b>13<sub>B</sub></b>	0,104	0,202	0,002	0,186	0,365	0,007

Tabella 17 – Risultati degli spostamenti per ogni prisma, ottenuti dai files di acquisizione dati

<b>Nr. Prisma</b>	<b>Spostamenti mensili minimi (m)</b>			<b>Spostamenti mensili massimi (m)</b>		
	<b>Dx</b>	<b>Dy</b>	<b>Dz</b>	<b>Dx</b>	<b>Dy</b>	<b>Dz</b>
<b>1<sub>B</sub></b>	0,002	0,000	0,001	0,897	2,159	0,043
<b>4<sub>B</sub></b>	0,001	0,017	0,006	3,729	7,633	3,349
<b>8<sub>B</sub></b>	0,001	0,014	0,002	0,473	0,734	0,013
<b>13<sub>B</sub></b>	0,011	0,077	0,000	3,916	7,656	0,097

Tabella 18 – Spostamenti mensili raggruppati per ogni prisma

<b>Nr. Prisma</b>	<b>Velocità istantanee (m/s) minime</b>			<b>Velocità istantanee (m/s) massime</b>		
	<b>Vx</b>	<b>Vy</b>	<b>Vz</b>	<b>Vx</b>	<b>Vy</b>	<b>Vz</b>
<b>1<sub>B</sub></b>	4,57027E-09	4,69872E-09	0	0,004	0,010	0,001
<b>4<sub>B</sub></b>	4,08187E-09	7,41699E-09	0	0,007	0,026	0,002
<b>8<sub>B</sub></b>	3,14281E-09	1,24408E-08	1,27959E-08	0,083	0,068	0,040
<b>13<sub>B</sub></b>	8,48701E-08	3,15748E-09	5,50407E-08	0,020	0,034	0,002

Tabella 19 – Velocità istantanee calcolate in base agli spostamenti totali per ogni prisma

In base a questi dati e in base agli spostamenti rilevati nei files forniti dal CNR, dalle velocità istantanee calcolate e dalle velocità classificate da Varnes – Figura 51 – risulta che la frana di Montaguto ha un range di velocità, che varia da “rapid” a “very slow”.

## CAPITOLO 5

### Analisi dei sistemi GNSS per il monitoraggio dei versanti in frana

#### 5.1 Impostazioni degli esperimenti da eseguire

Dalla Figura 51 e i dati ottenuti per il caso in studio, frana di Montaguto, sono state scelti 10 prove da eseguire - 5 in planimetria e 5 in altimetria - appartenenti a diverse classi di velocità di spostamento. Le 10 prove (5 in planimetria e 5 in altimetria) sono state divise nel modo seguente:

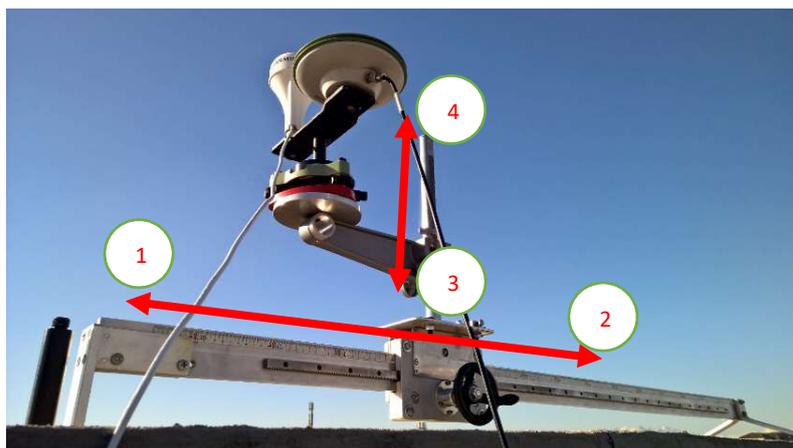


Figura 58 - Direzione dello spostamento

<b>Nr.prova</b>	<b>Direzione dello spostamento</b>	<b>Entità dello spostamento (cm)</b>	<b>Tempi di fermo fra gli spostamenti (min)</b>	<b>Nr. spostamenti</b>	<b>Classe di velocità secondo Varnes</b>
<b>1</b>	1 - 2	30	5	4	" Rapid"
	2 - 1	6	1	20	
<b>2</b>	1 - 2	15	5	8	Tra "Rapid" e "Moderate"
	2 - 1	3	1	40	
<b>3</b>	1 - 2	9	5	14	"Moderate"
<b>4</b>	1 - 2	0,5	20	5	"Slow"
<b>5</b>	1 - 2	0,2	20	5	" Slow"

*Tabella 20 – Prove in planimetria*

<b>Nr.prova</b>	<b>Direzione dello spostamento</b>	<b>Entità dello spostamento (cm)</b>	<b>Tempi di fermo fra gli spostamenti (min)</b>	<b>Nr. spostamenti</b>	<b>Classe di velocità secondo Varnes</b>
<b>1</b>	3 - 4	20	5	1	" Rapid"
	4 - 3	4	1	5	
<b>2</b>	3 - 4	15	1	1	Tra "Rapid" e "Moderate"
	4 - 3	3	5	5	
<b>3</b>	3 - 4	9	5	2	"Moderate"
<b>4</b>	3 - 4	0,5	20	5	"Slow"
<b>5</b>	3 - 4	0,2	20	5	" Slow"

*Tabella 21 – Prove in altimetria*

Dove è stato possibile, ovvero per le prime due prove, per arrivare al punto di partenza, sono state eseguite sia avanti che indietro.

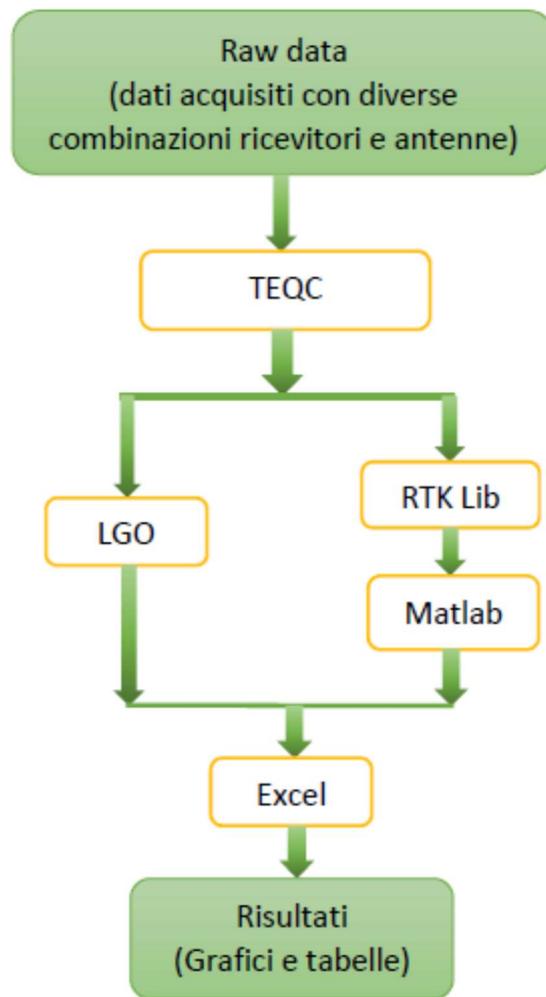


Figura 59 – Procedura di trattamento dei dati nella presente tesi

## 5.2 Scelta della strumentazione utilizzata e software utilizzati

### 5.2.1 Strumentazione utilizzata

Per raggiungere gli obiettivi preposti, sono stati scelti due tipi di ricevitori, con delle caratteristiche molto diverse tra loro e di differente qualità, in modo da poter permettere la valutazione di ognuno di essi:

- ricevitore a singola frequenza, con un costo variabile di 100 – 200 €;
- ricevitore geodetico GNSS multi costellazione, con un costo di 8.000 -60.000 €;

Questi ricevitori sono stati utilizzati insieme a tre tipi diversi di antenne:

- antenna geodetica - LEIAX1202GG - multi costellazione e multifrequenza, che si trova in dotazione al ricevitore geodetico.
- antenna singola frequenza – Garmin - in grado di ricevere il segnale su una sola frequenza - con un costo di 170 - 200€. Anche quest'antenna segue lo standard degli strumenti topografici, per quanto riguarda il montaggio.
- antenna singola frequenza – patch.

La scelta della strumentazione operata è dettata dalle varie caratteristiche:

- acquisizione dati in doppia e in singola frequenza;

Dato che questi strumenti saranno destinati al monitoraggio dei versanti in frana, che possono avere anche eventi catastrofici, con la distruzione totale dell'apparecchiatura, un fattore non di poco conto è anche il costo. Per questa ragione, nella scelta della strumentazione si è tenuto conto anche del rapporto prestazioni/costo. Su questa linea si è utilizzato, ad esempio, un ricevitore a basso costo con un'antenna di un costo superiore, per valutare la modalità di poter sostituire un ricevitore costoso.

### 5.2.1.1 U-blox

Il ricevitore U-blox è a singola frequenza, appartenente ad una fascia di prezzo economica, compresa tra 100 e 200€, che non presenta un display, quindi può essere utilizzato solo se collegato ad un computer tramite porta USB, di cui è provvisto. Questa porta USB fornisce anche l'energia all'apparecchio e permette un rapido trasferimento dei dati al computer.

Il ricevitore è di dimensioni ridotte – approssimativo di 10 cm – ed è dotato di un connettore SMA che consente di connettere un'antenna qualsiasi.

Il ricevitore è in grado di calcolare una PVT (position velocity and timing), ovvero stima una traiettoria, tenendo conto della dinamica del moto cui è soggetto. Tutto ciò consente di raggiungere delle precisioni sub-metriche, essendo soddisfacenti per la navigazione.

I formati utilizzati dal ricevitore sono l'ubx, per le osservazioni grezze, in formato UBX, o NMEA, quando le posizioni sono calcolate direttamente dal motore di calcolo interno.



Figura 60– Il ricevitore U –blox – M8N e l'antenna in dotazione al dispositivo

Per il ricevitore a singola frequenza, oltre all'antenna in dotazione, per questo lavoro sono state utilizzate anche un'antenna a singola frequenza Garmin ed un'antenna geodetica, come illustrato nella figura seguente.



Figura 61– Antenna geodetica e antenna a singola frequenza, connesse ad un ricevitore u-blox

#### 5.2.1.2 Leica GX1230 GG

Per il lavoro svolto nella presenta tesi è stato utilizzato un ricevitore geodetico Leica GX1230 GG, in possesso al dipartimento.

Questo tipo di ricevitore è dotato di un'interfaccia propria, di un software ed ha le seguenti principali caratteristiche:

- ricevitore universale per tutte le applicazioni;
- i segnali ricevuti sono multi costellazione su due frequenze: 14L1+14L2 – GPS, 12L1+12L2 – GLONASS;
- la registrazione dei dati attraverso la memoria interna o a una scheda compact flash di cui il dispositivo è provvisto;
- opera in RTK e DGPS;
- può essere utilizzato come *rover* o come *stazione master*;



Figura 62– Il ricevitore geodetico Leica GX1230 GG

Il ricevitore Leica può raggiungere delle precisioni millimetriche in orizzontale e in verticale, sia in statica che in cinematica. “La precisione dipende da molti fattori, tra cui il numero dei satelliti tracciati, la geometria della costellazione, la durata dell’osservazione, la precisione delle effemeridi, il multipath e la risoluzione dell’ambiguità” [29].



*Figura 63- Il ricevitore Leica utilizzato per la fase di acquisizione dati della presenta tesi*

### **5.2.1.3 Slitta micrometrica**

Lo scopo principale della presenta tesi è stato individuare degli spostamenti in altimetria e planimetria con diversi sistemi GNSS e valutare l’impiego di essi nel monitoraggio dei versanti in frana. Per poter realizzare il principale obiettivo è stato necessario utilizzare una slitta micrometrica, che si trova in possesso al dipartimento.

Questa slitta micrometrica è stata costruita dal dipartimento ed è composta da:

- una barra metallica – in alluminio – di lunghezza di 140 cm, per i movimenti orizzontali, e un’altra, di lunghezza di 30 cm, per i movimenti in altimetria. Queste due barre metalliche sono provviste di gradazioni millimetriche; in tale modo si possono effettuare degli spostamenti controllati;
- un supporto, che permette l’installazione dell’antenna, in base al ricevitore utilizzato;
- due manopole, che permettono lo spostamento sia in planimetria che in altimetria dell’antenna;
- alle estremità della barra metallica, per i movimenti sia in planimetria che in altimetria, sono presenti degli elementi di fissaggio a terra.



*Figura 64– Slitta micrometrica con le due antenne – geodetica e singola frequenza – collegate al ricevitore u-blox*

### **5.2.2 Software utilizzati**

Per ogni prova considerata, sono stati utilizzati vari ricevitori, connessi a vari tipi di antenne, in modo tale da valutare la precisione di ognuno.

Nell'analisi delle misurazioni effettuate, si è eseguita una strategia, che in linea di massima può essere articolata in 5 passi fondamentali, presentati nella tabella seguente.

<b>Software</b>	<b>Funzioni</b>	<b>Uso</b>
<b>TEQC</b>	Transformazione formato dati	Tutti i dati raccolti sono stati divisi in pacchetti di diverse grandezze – da 10 secondi a 17 minuti - in funzione dell'intervallo di tempo fra gli spostamenti.
	Editing	Trasformare dei files contenenti dati raccolti, dal formato del ricevitore, in formato Rinex.
<b>LGO</b>	Trattamento in fase statica e in fase cinematica	Il calcolo delle baselines e le coordinate dei punti misurati, per le prove con il ricevitore geodetico.
<b>RTK Lib</b>	RTKCONV	Conversione dei files dal formato proprietario in formato RINEX.
	RTKPOST	Processare i dati, per stimare le coordinate dei punti misurati.
<b>Matlab</b>	Software per il linguaggio del calcolo tecnico	Trasformare le coordinate geografiche in coordinate cartografiche e il plottaggio dei vari grafici, per le prove eseguiti con il ricevitore U-Blox.
<b>Excel</b>	Produzione e gestione dei fogli elettronici	Individuare i vari spostamenti effettuati e calcolare le varie differenze tra gli spostamenti effettuati e quelli trovati, oltre che calcolare vari scarti quadrati medi e creazioni di vari grafici degli spostamenti.

*Tabella 22 - Software utilizzati per il trattamento dei dati*

### 5.2.2.1 TEQC

Il programma TEQC è stato sviluppato dall'UNAVCO, un consorzio di università non-profit, che promuove la ricerca e la didattica nel campo della Geodesia. Il TEQC è un acronimo che sta per Translation Editing and Quality Check e deriva dalle tre principali funzioni che il software è in grado di svolgere. Queste sono:

1. Trasformazione del formato dei dati, da quello originario – ogni ricevitore ha il proprio formato – al RINEX – formato accettato da LGO – con la creazione dei files OBS, NAV, e/o MET, quest’ultimo essendo un file usato a scopi meteorologici.
2. Operazioni di “editing”; estrazione di dati, correzioni dell’header, divisione dei file in base alle finestre temporali, ecc.
3. Controllo dati da processare.

Il software non ha una propria interfaccia grafica, ma richiede l’immissione dei comandi direttamente nell’interfaccia a linea di comando DOS.

In primo luogo si è proceduto alla trasformazione in files RINEX di tutti quei files che appartengono ad altri formati. I comandi utilizzati in questo caso sono:

- `teqc +obs output.15o +nav output 15n -leica mdb inputdatafile`

Il comando scritto in precedenza serve per passare i files di osservazione, dal formato “.m00” – formato del Leica GX1230 GG – al formato RINEX. Questo comando è utilizzato per le prove effettuate nel 2015- “15O”; invece, per le prove effettuate nel 2016, il comando è il seguente:

- `teqc +obs output.16o +nav output 16n -leica mdb inputdatafile`
- `teqc +obs output.15o +nav outputfile.15n -ublox ubx inputdatafile.`

L’ultimo comando serve per passare dal file .ubx – formato dell’U-blox – al file RINEX.

Per i files forniti dal sito della regione, il formato è RINEX, quindi non necessitano della trasformazione attraverso `teqc`.

Per la seconda operazione svolta, quella di divisione dei files in finestre temporali minori, i comandi eseguiti con il software `teqc` sono i seguenti:

- `teqc st 00:00:00 – dm outputfile inputdatafile`

Questo comando è stato utilizzato per la divisione dei files dati in diverse finestre temporali con la dimensione minima di un minuto, invece, per le finestre temporali inferiori, si è eseguito il seguente comando:

- `teqc st 00:00:00 – ds outputfile inputdatafile`

In questo modo, ogni prova avrà un numero diverso di pacchetti dei dati, in funzione della durata della prova e del numero di spostamenti effettuati.

Gli esperimenti da eseguire sono stati ideati con periodi di fermo, che variano da un minuto a 20 minuti, e con periodi di spostamenti controllati che variano da 0,002m a 0,3m.

Per poter evidenziare i periodi di fermo e di spostamento controllato, i file di ogni esperimento è stato diviso nei pacchetti – finestre temporali, dove il periodo di fermo si è cercato di contenerlo in una sola finestra; invece il periodo di spostamento in un’altra finestra. In questo modo sono state ideate delle finestre temporali, che hanno un periodo che parte da 20 secondi fino ad un massimo di 17 minuti. Con questo spaccettamento dei dati, in fase di analisi con i vari software utilizzati, si facilita il trattamento del dato raccolto. Siccome lo spostamento è stato effettuato in modo controllato, ovvero l’entità di esso si conosce, con lo spaccettamento dati si mettono in evidenza i periodi di fermo, dove lo spostamento deve essere zero e i periodi di spostamento, dove, in quel pacchetto dati, si può evidenziare lo spostamento.

Dopo vari tentativi, in base all'attendibilità del dato trovato, il numero di pacchetti temporali per ogni prova è elencato nella tabella seguente:

<b>Tipo prova</b>	<b>Nr. prova</b>	<b>Nr. pacchetti</b>
<b>Planimetria</b>	1	48
	2	98
	3	15
	4	11
	5	11
<b>Altimetria</b>	1	14
	2	12
	3	5
	4	11
	5	11

*Tabella 23– Numero di pacchetti per ogni prova effettuata*

Su tutti i comandi usati nel software teqc, per `inputdatafile` si intende il file sul quale si vuole effettuare un'operazione; invece il file ottenuto come risultato dell'operazione è indicato come `outputfile`.

### **5.2.2.2 LGO**

LGO (Leica Geo Office) è un software commerciale, che permette di importare i dati grezzi in formato RINEX e processarli, per stimare le baselines e le coordinate dei punti misurati. In particolare, è stata utilizzata la versione 8.0 del programma.

LGO è dotato di un'interfaccia grafica; per questa ragione è reso user-friendly. Di seguito, sono illustrate le operazioni necessarie per il processamento dei dati raccolti per il lavoro svolto in questa tesi.

Il lavoro con LGO è stato pensato dividendolo in due fasi:

1. Trattamento dei dati in fase statica;
2. Trattamento dei dati in fase cinematica.

La differenza fra questi due trattamenti è: per il trattamento in fase statica, le soluzioni generate dal programma avranno valori medi; ovvero, per ogni pacchetto di dati, si stima una soluzione media; invece, per il trattamento in fase cinematica, si avrà una soluzione per ogni dato raccolto, ovvero, per ogni secondo, per cui il programma genera una soluzione. Il trattamento dei dati in fase statica è stato effettuato solo per le prove con antenna Leica e ricevitore geodetico.

In primo luogo sono stati creati dei progetti per ogni prova effettuata con diversi strumenti e le diverse antenne, ovvero:

1. 10 progetti (5 per le prove in planimetria, 5 per prove in altimetria) per il ricevitore Leica e l'antenna geodetica;
2. 10 progetti per il ricevitore U-blox e l'antenna geodetica;
3. 10 progetti per il ricevitore U-blox e l'antenna a singola frequenza (Garmin);
4. 10 progetti per il ricevitore U-blox e l'antenna Patch.

Una volta aperto il progetto, sono stati importati i dati grezzi, mediante l'icona *Import raw data*, presente nella barra di accesso rapido del programma (Figura 65).

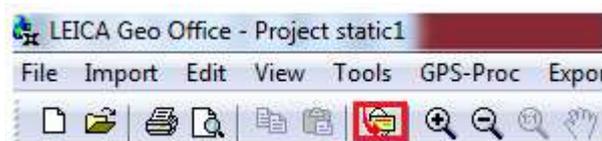


Figura 65 – Dettaglio della barra degli strumenti – l'icona importa dati

Tutti i dati relativi alle antenne sono stati scaricati dalla pagina <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/> del sito del *National Geodetic Survey* (NGS) e importati in LGO, che associa automaticamente le antenne ai files .obs, grazie alle informazioni contenute nell'header dei files RINEX.

Una volta trovate le coordinate per le V.R.S, dal sito della regione sono stati presi i files RINEX inerenti ai punti, di seguito caricati in LGO, questi dati essendo usati come stazione master, evidenziati in rosso – l'icona con martelletto rosso dalla barra degli strumenti del LGO. I dati raccolti, oggetto di studio del presente lavoro, sono dati rover, evidenziati in verde – l'icona con martelletto verde dalla barra degli strumenti.

Per quanto riguarda le effemeridi, sono state utilizzate le Broadcast trasmesse dai ricevitori. Dato che, nell'utilizzo per monitoraggio dei versanti in frana, a volte risulta importante il fattore tempo, come per fenomeni in rapida evoluzione, diventa importante la precisione del dato ottenuto con le effemeridi trasmesse dai ricevitori. Queste effemeridi, nel formato .nav, sono state caricate nel programma insieme ai files .obs. L'utilizzo delle effemeridi precise necessita di un ulteriore tempo, essendo necessario scaricare i files .sp3, dal sito dell'IGS, che contengono i parametri orbitali, relativi alle epoche del rispettivo esperimento. Solo per il trattamento in fase statica, per gli spostamenti appartenenti alla categoria "slow" – secondo Varnes – si è proceduto al trattamento dei dati anche con le effemeridi precise, con lo scopo di individuare eventuali miglioramenti della precisione del dato. Per importarle, bisogna cliccare sulla barra degli strumenti alla voce "import" e, nel menu aperto, selezionare "precise ephemeris".

Per far sì che il programma le utilizzi in fase di calcolo, si deve selezionare l'icona "data processing parameters" e, nella finestra che compare, si deve specificare che si intende utilizzare le effemeridi precise.

Infine si è proceduto al trattamento dei dati, cliccando sull'icona "Process" dalla barra degli strumenti del programma.

I risultati ottenuti con LGO, sono consultabili nel report finale elaborato dal programma ed esportabili in file di testo, cliccando l'icona "Export ASCII data" dalla barra degli strumenti.

Dallo studio dei risultati ottenuti con LGO, si è osservato che solo per gli spostamenti effettuati con il ricevitore Leica è possibile ottenere dei files con dei dati attendibili, perché, per gli altri, effettuati con il ricevitore U-blox, il programma non è in grado di compensare la rete ed i dati rimangono di navigazione. Per questa ragione, i risultati non sono attendibili.

Per il trattamento dei dati in fase cinematica, il procedimento con il programma LGO è lo stesso, solo che si è rivelato necessario introdurre nei files RINEX il codice "START MOVING ANTENNA".



Figura 66 – Dettaglio della barra degli strumenti – l'icona esporta dati

### 5.2.2.3 RTK lib 2.4.2

RTK lib è un software a titolo gratuito, che ha tante funzioni; ma nel lavoro svolto nella presente tesi sono state utilizzate le seguenti: RTKCONV e RTKPOST – vedi Tabella 22.

RTK lib è dotato di un'interfaccia grafica; per questa ragione è considerato user-friendly. In particolare è stata utilizzata la versione 2.4.2 del programma.

Di seguito, sono presentate le varie operazioni, utilizzate per processare i dati raccolti per il lavoro della presente tesi.

Per convertire i files dal formato di ogni apparecchio al formato RINEX, dalla sezione *bin* del programma si deve selezionare l'applicazione RTKCOV e, una volta aperta, nell' *input directory* si deve selezionare il file da convertire, mentre nell'*output directory* si deve selezionare la cartella, dove si desidera salvare il file una volta convertito.

Per processare i dati e stimare le coordinate dei punti misurati, è stata scelta dal programma l'applicazione RTKPOST. Una volta aperta, si sceglie il file da processare e uno dei files delle stazioni virtuali create in precedenza. In questo modo, per ogni file con i dati acquisiti, dopo il processamento dei dati si ottengono due files, uno per ogni stazione virtuale.

<b>Parametri elaborazioni</b>	<b>Opzione scelta</b>
<b>Satellite system</b>	GPS+GLONASS
<b>Rinex.obs: Rover</b>	Il file da elaborare
<b>Rinex.obs: Station</b>	Il file fornito da SPIN GNSS relativo al V.R.S - file master
<b>Positioning Mode</b>	Kinematic
<b>Frequencies</b>	L1+2
<b>Elevation Mask</b>	15
<b>Ionosphere correction</b>	Broadcast
<b>Troposphere Correction</b>	Broadcast
<b>Satellite Ephemeris</b>	Broadcast
<b>Min. ratio</b>	2

*Tabella 24 - Elenco delle opzioni scelte per il software RTK Lib*

Nella Tabella 24 sono presentate le varie opzioni per il trattamento dei dati con RTK Lib:

- Dalle opzioni si possono scegliere l'esclusione delle varie costellazioni. In questo caso sono state considerate le costellazioni GPS e GLONASS, essendo le uniche con un numero sufficiente di satelliti per poter ricevere un buon segnale per il trattamento dei dati;
- la modalità scelta per il trattamento dati, è cinematica. Questa modalità permette di avere una soluzione per ogni secondo e per ogni baseline;
- dato che nella fase di acquisizione dati sono stati utilizzati anche ricevitori e antenne che ricevono segnali satellitari su doppia frequenza, sono state scelte le frequenze L1 e L2;
- per quanto riguarda le effemeridi, per ragioni spiegati in precedenza, sono state scelte le broadcast;
- tra le opzioni del software per il trattamento dei dati è presente la modalità per il fissaggio dell'ambiguità di fase. Questa opzione permette al programma di eliminare un numero minimo di soluzioni che sono lontane dalla media delle altre e sta all'operatore scegliere quante di queste soluzioni vanno eliminate. Per il lavoro di questa tesi si è scelto di eliminare un minimo di 2 soluzioni. Questo settaggio prende nome di "Ratio".

Una volta processati i dati ed esportati in excel si è notato il fatto che il programma stima una qualità della soluzione che va da uno, considerata una buona soluzione, fino a cinque. La qualità della soluzione dipende anche dalla qualità del segnale ricevuto dai satelliti, ovvero un segnale buono senza tanta rumorosità, genera una soluzione di qualità uno, al contrario il programma genera una soluzione di minore qualità che va dal valore due in avanti. Dove la soluzione risultata dal trattamento dei dati è maggiore di uno si nota il fatto che il valore dello spostamento trovato è lontano dalla realtà, tutte queste soluzioni vanno eliminate.

# CAPITOLO 6

## Analisi dei risultati

Considerando i ricevitori e le antenne a disposizione, sono state definite le seguenti configurazioni

- Configurazione 1: ricevitore Leica e antenna geodetica;
- Configurazione 2: ricevitore U-Blox e antenna geodetica;
- Configurazione 3: ricevitore U-Blox e antenna Garmin – a singola frequenza;
- Configurazione 4: ricevitore U-Blox e antenna tipo Patch

Configurazione	Tipo di trattamento	Software utilizzati
1	Statico	LGO
	Cinematico	LGO+RTK Lib
2	Statico	-
	Cinematico	RTK Lib
3	Statico	-
	Cinematico	RTK Lib
4	Statico	-
	Cinematico	RTK Lib

*Tabella 25 - Tipi di trattamento dei dati acquisiti*

Nella Tabella 25, dove sono presentati i vari tipi di trattamento dati, per tutte le combinazioni descritte in precedenza, si nota il fatto che il trattamento in fase statica è stato possibile solo per la prima combinazione e per il trattamento in fase cinematica è stato possibile utilizzare i due software solo per la prima combinazione, in quanto per le altre

combinazioni il programma LGO non è stato in grado di fissare l'ambiguità di fase, compensare la rete e di generare una soluzione che può essere considerata attendibile.

Per tutti i tipi di trattamento dei dati sono stati generati dei grafici contenenti gli spostamenti e le differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli trovati con diverse modalità di trattamento. Tutte le differenze presentate nei grafici sono in valore assoluto.

## 6.1 Trattamento dei dati in modalità statica

Per ogni pacchetto temporale, ottenuto con l'ausilio del programma TEQC, si è calcolato una soluzione attraverso LGO. Per gli spostamenti effettuati con antenna geodetica e ricevitore Leica, nei grafici seguenti, sono riportati i risultati ottenuti e le differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli ottenuti.

Nelle Tabella 20 e Tabella 21 del precedente capitolo, sono presentate tutte le prove/spostamenti da eseguire, con le classi di velocità di appartenenza, tutte queste essendo numerate da 1 a 5 sia in planimetria che in altimetria.

Nel trattamento dei dati mediante LGO e RTK Lib, una fase importante la costituisce la creazione dei virtual station (V.R.S). Per il lavoro svolto nella presente tesi, le virtual station sono state considerate a 100m e a 1.000m.

Dato che lo scopo del presente lavoro è il monitoraggio dei versanti in frana, diventa importante l'ubicazione delle V.R.S, ovvero la collocazione di esse fuori corpo frana. Un altro criterio importante è l'individuazione di eventuali barriere naturali (la conformazione del territorio – valli, pendenze, foreste ecc) e barriere architettoniche (manufatti stradali e ferrovie, centri abitati) e l'ubicazione delle VR al di fuori di esse. Con l'ausilio di Google Earth sono state individuate le coordinate geografiche delle due VR, create rispettivamente a 100m e a 1.000m, come segue:

- Per VR. a 100m le coordinate geografiche sono:  $45^{\circ}03'49.57''$  N e  $7^{\circ}39'40.81''$  E per il primo punto e  $45^{\circ}03'52.09''$  N e  $7^{\circ}39'36.82''$  E per il secondo punto.
- Per VR a 1.000m le coordinate geografiche sono:  $45^{\circ}03'36.19''$  N e  $7^{\circ}39'36.99''$  E per il primo punto e  $45^{\circ}03'52.10''$  N e  $7^{\circ}39'18.16''$  E per il secondo punto.

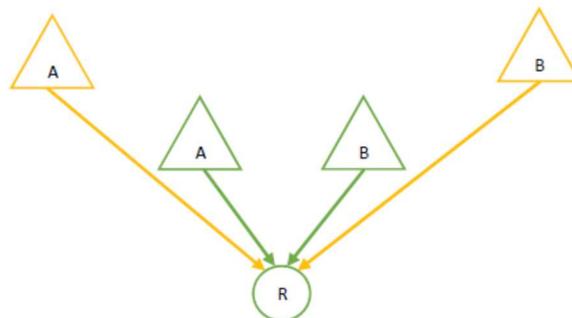


Figura 67 – Posizionamento di Virtual Rinex Station

In Figura 67 si presenta la distribuzione dei due punti, rispettivamente il punto a e il punto b, di una Virtual Rinex Station posta a 100m (colore verde) di distanza rispetto al ricevitore e antenna utilizzata. Con R si è notato il ricevitore che può essere, come detto in precedenza, a doppia o a singola frequenza, in combinazione con le diverse antenne. In modo analogo, si è creata una Virtual Rinex Station, con i due punti a e b, posta a 1000m (colore giallo) di distanza rispetto al ricevitore e antenna utilizzata.

Per il trattamento dei dati con i software LGO e RTK Lib, ovvero per il calcolo delle baseline, c'è bisogno di una stazione di riferimento, che, come spiegato in precedenza, può essere anche virtuale.

### 6.1.1 Spostamenti in planimetria

Nel Figura 68 sono presentati gli spostamenti trovati con l'analisi in modalità statica. Si osserva il fatto che sono trovati 23 spostamenti, anche se in realtà sono stati eseguiti 24 spostamenti. Questo è dovuto al fatto che l'ultimo spostamento effettuato, ovvero di 0,06m, nel trattamento del dato con LGO non è stata fissata l'ambiguità di fase e di conseguenza, non è stata calcolata la soluzione, quindi il dato non può essere attendibile. Per questa ragione, il dato va eliminato.

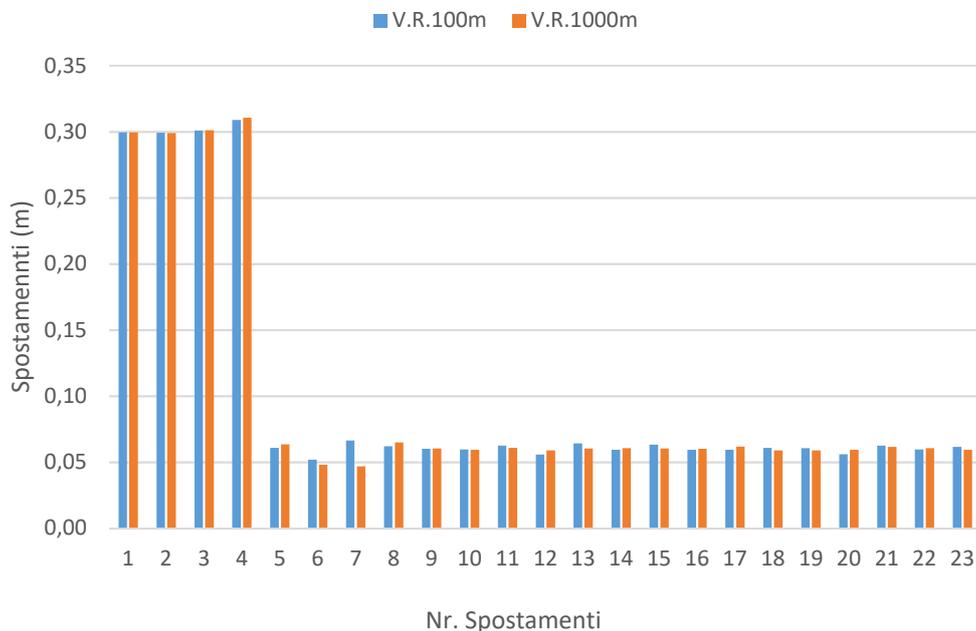


Figura 68 - Spostamenti trovati la per prova 1

Nella Figura 69 sono presentate le differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati in seguito al trattamento dati con LGO. Si può osservare che, in seguito al trattamento dei dati in modalità statica, eseguito con LGO, per V.R.S. a 1000m, le differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati, ad eccezione degli spostamenti 19, 21 e 47 sono maggiori.

Nella seconda prova, come descritto nel precedente capitolo, gli spostamenti effettuati nella prima prova sono di 0,15m ogni 5 minuti e 0,03m ogni minuto, per un totale di 48 spostamenti.

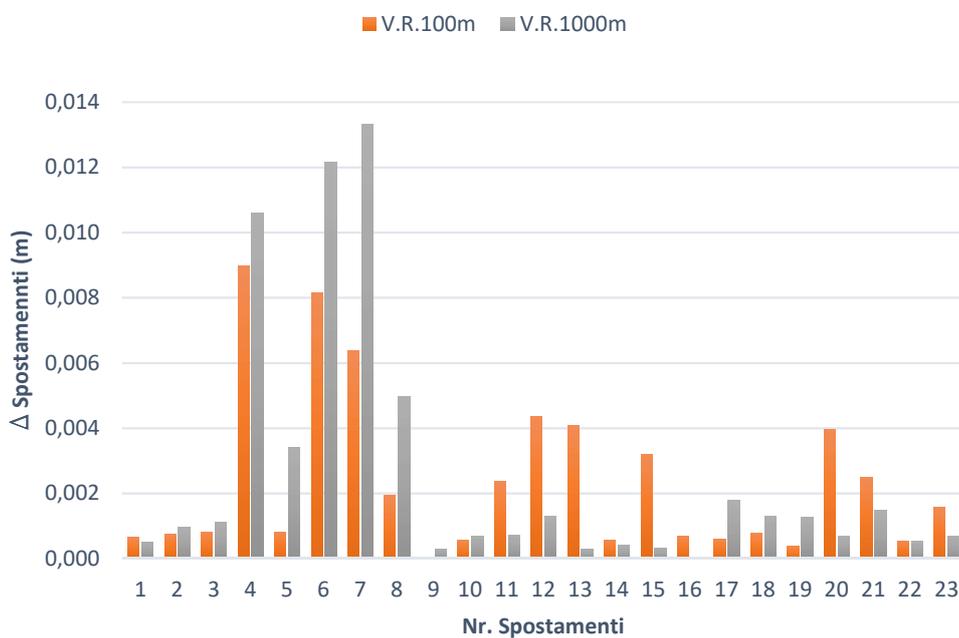


Figura 69 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati per la prova 1

Nella Figura 70 sono presentati i dati per gli spostamenti trovati in seguito al trattamento in modalità statica con LGO, per le due V.R.S.

Nella Figura 71 sono presentate le differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli trovati in seguito al trattamento dati con LGO in modalità statica. Si può notare il fatto che, nella maggior parte del dato, le differenze maggiori sono ottenute con V.R.S. posta a 1000m.

Per gli spostamenti in planimetria, dal Figura 71, si può osservare che le differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli trovati sono al di sotto del centimetro, con una sola eccezione, dove si arriva ad una differenza di 0,012m nel quinto spostamento.

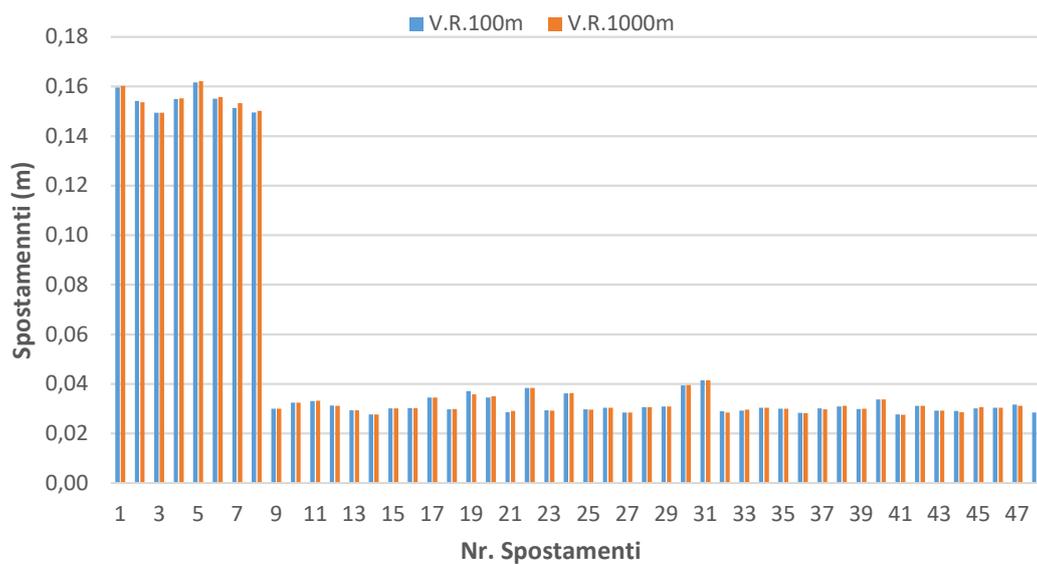


Figura 70 - Spostamenti trovati per la prova 2

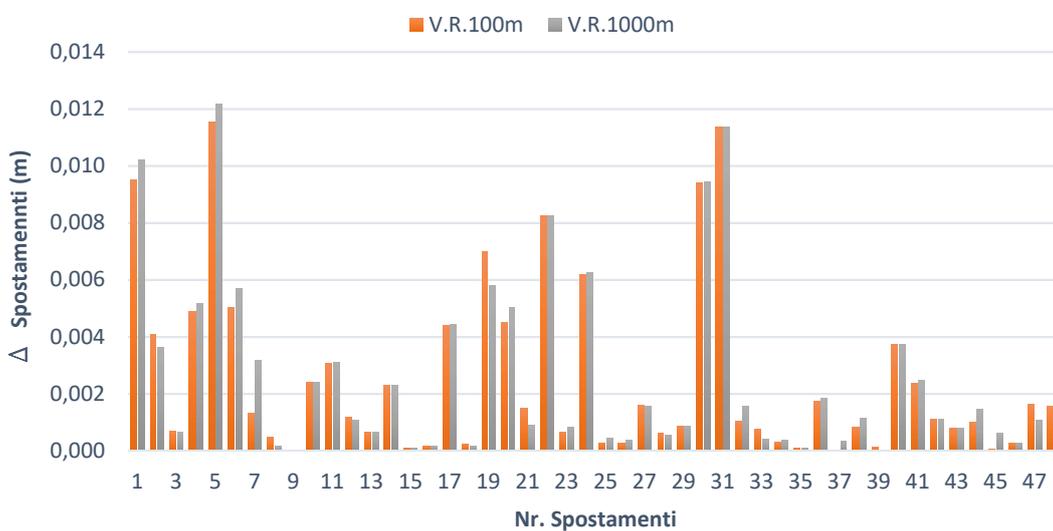


Figura 71 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati la prova 2

Nella Figura 72 sono rappresentati gli spostamenti trovati in seguito al trattamento dei dati per le due V.R.S, per la terza prova e nella Figura 73 sono rappresentate le differenze fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati. Si nota il fatto che non ci sono grosse differenze fra le due V.R.S. Per gli spostamenti 2,5, 6 e 13 si osserva dal grafico, una differenza maggiore di 0.005m fra gli spostamenti rilevati e quelli effettuati. Dato che il numero dei satelliti risulta essere costante per tutto il file di acquisizione dati, tra 11 e 15, questa differenza può essere causata da qualche errore residuo o altri errori non modellabili dal software.

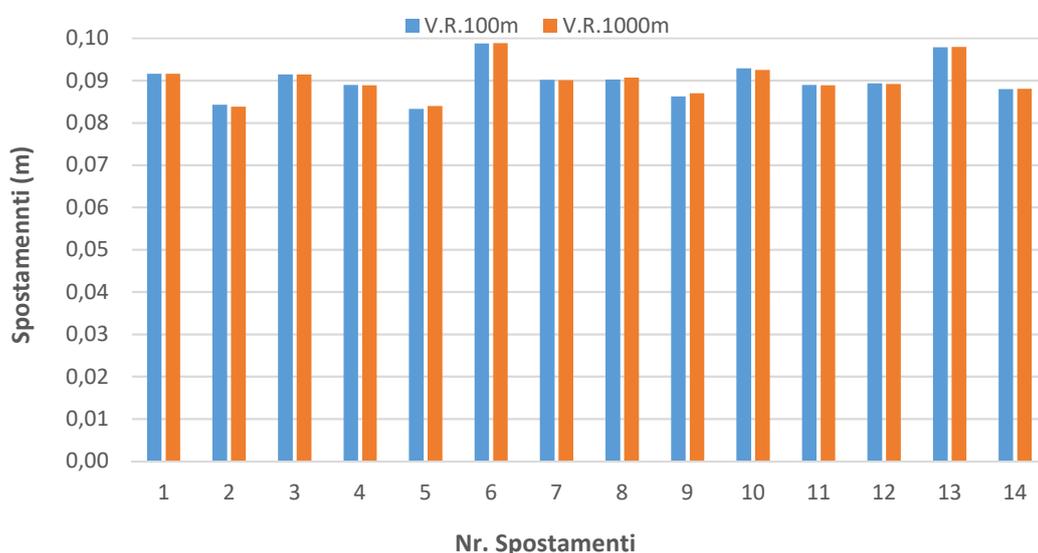


Figura 72 - Spostamenti trovati per la prova 3

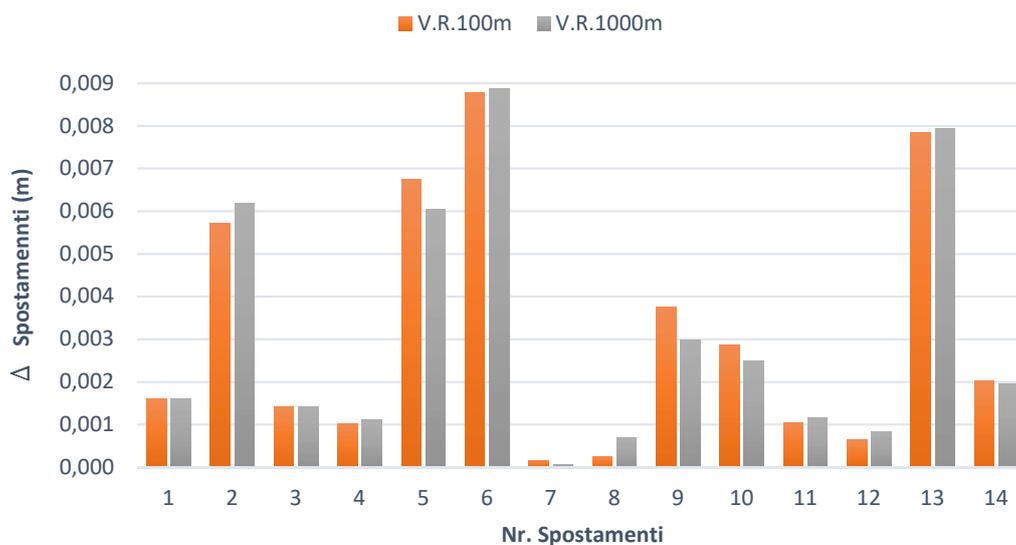


Figura 73- Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati per la prova 3

Per la quarta prova, gli spostamenti appartengono alla categoria “slow”, come classe di velocità, secondo Varnes. Sono state eseguiti degli spostamenti di 0,005m in planimetria, ogni 20 minuti, per un numero di 5.

Nella Figura 75, dove sono presentate le differenze fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati, si nota il fatto che le differenze fra le due V.R.S sono al di sotto del millimetro.

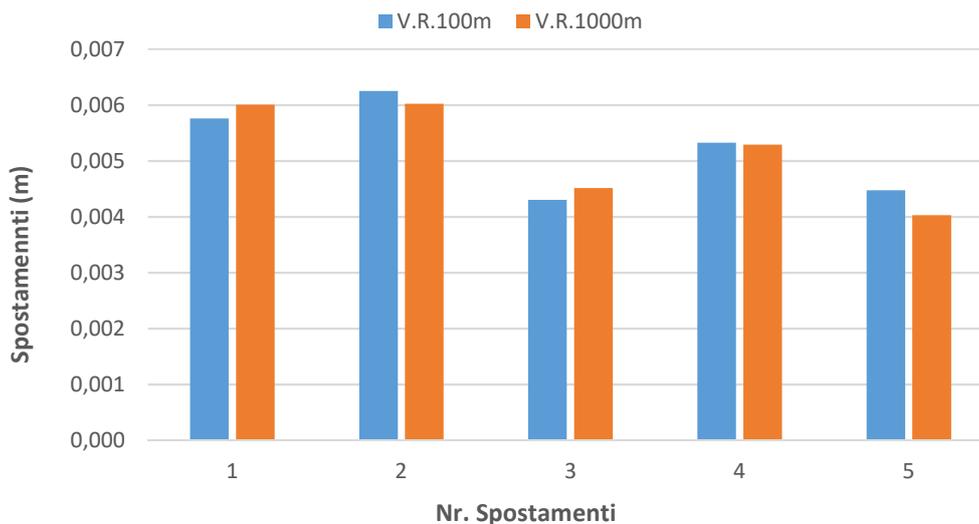


Figura 74 - Spostamenti trovati per la prova 4

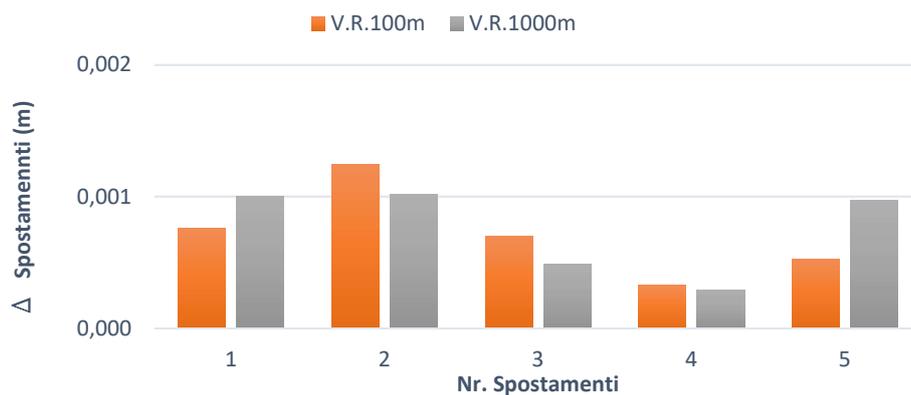


Figura 75 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati per la prova 4

Per la quinta prova in planimetria, gli spostamenti appartengono alla categoria “slow”, ovvero 0,002m ogni 20 minuti, per un numero di 5 spostamenti.

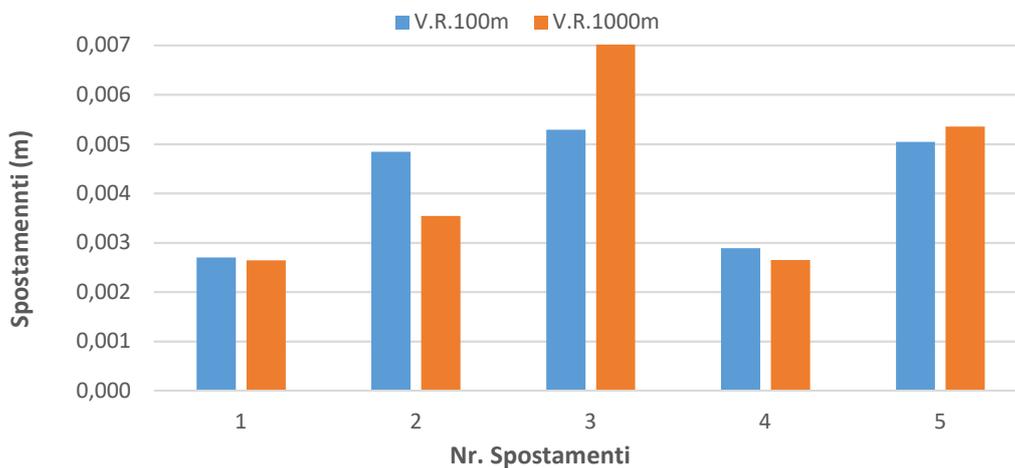


Figura 76 - Spostamenti trovati in seguito al trattamento dati con effemeridi broadcast per la prova 5

Dalla Figura 77 si può osservare che la differenza fra gli spostamenti effettuati e quelli trovati supera l'effettivo spostamento, ovvero sono trovati degli spostamenti che variano da un minimo di 0,003m ad un massimo di 0,007m. Il dato è stato processato in LGO utilizzando le effemeridi broadcast e si osserva che è molto rumoroso, con il rumore che arriva fino ad un massimo di 0,004m. Per questa ragione si è cercato di togliere il rumore, processando il dato in LGO con le effemeridi precise. Neanche con questo tipo di effemeridi non si riesce a togliere il rumore e non si distingue il valore dello spostamento, avendo delle differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli trovati di un massimo di 0,003m, che supera lo spostamento effettivo. Si può osservare un leggero miglioramento nella qualità della soluzione con le effemeridi precise.

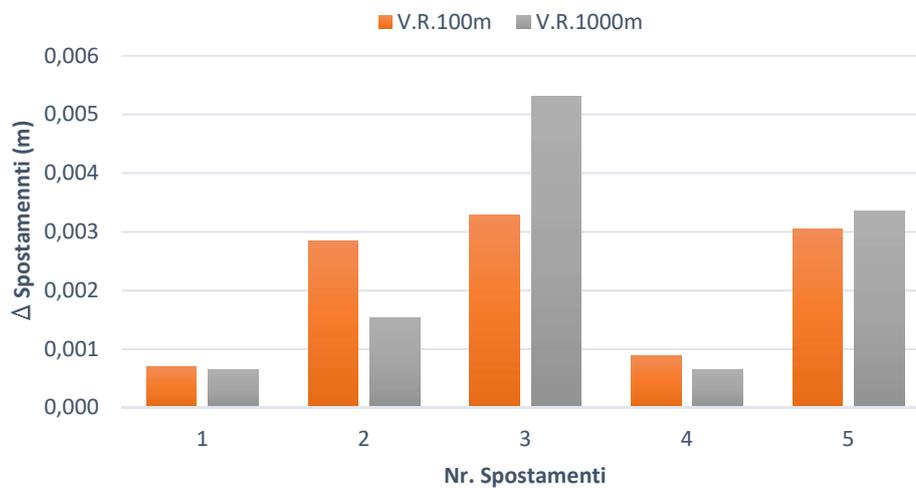


Figura 77 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati in seguito al trattamento dati con effemeridi broadcast per la prova 5

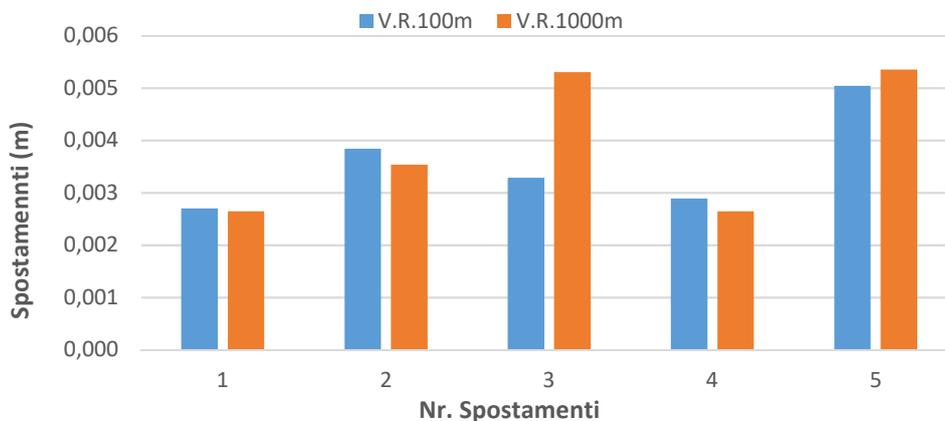


Figura 78 - Spostamenti trovati in seguito al trattamento dati con effemeridi precise per la prova 5

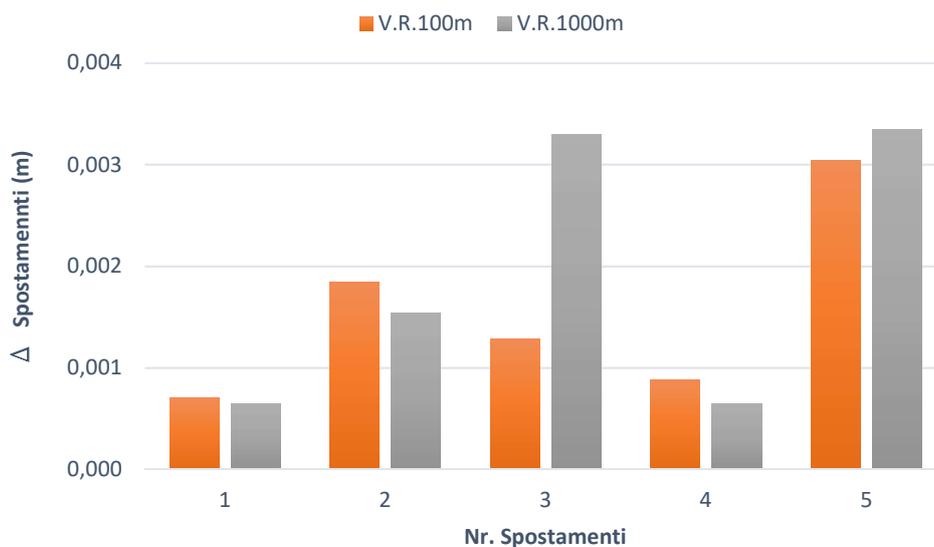


Figura 79 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati in seguito al trattamento dati con effemeridi precise per la prova 5

Nella Tabella 26 sono presentate i valori minimi, massimi e medi delle differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli trovati, con il processamento del dato in modalità statica per le prime quattro classi di spostamento. Si osserva il fatto che, ad eccezione di due prove, le prime due, dove si ha un valore massimo di 0,013m rispettivamente di 0,012m, tutti altri valori sia per i massimi, minimi e medi, sono al di sotto del centimetro, ovvero la precisione dei risultati è millimetrica. Il trattamento del dato è stato effettuato con le effemeridi broadcast.

Per gli spostamenti effettuati nella quinta prova, il segnale ricevuto dai satelliti è molto rumoroso, con degli errori residui o altri fattori non modellabili dal software che arriva fino ad un valore di 0,004m, che supera lo spostamento effettuato, ovvero 0,002m. Per questa ragione si è cercato distinguere il rumore dallo spostamento con il trattamento del dato anche con le effemeridi precise. Dalla Tabella 29, dove sono presentate i valori delle differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli trovati, si osserva il fatto che anche con il trattamento dal dato utilizzando le effemeridi precise, le differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli trovati non cambia molto ad eccezione di un spostamento dove si va da una differenza di 0,005m utilizzando le effemeridi broadcast ad una differenza di 0,003m utilizzando e effemeridi precise, quindi il rumore del segnale rimane con la sua entità, che a volte non si riesce a quantificarla. Dalle Tabella 27 e Tabella 28, dove sono presentati i valori dello spostamento in seguito al trattamento dei dati in modalità statica per gli spostamenti effettuati nella quinta prova si osserva un leggero miglioramento per il trattamento del dato utilizzando le effemeridi precise rispetto al trattamento del dato con effemeridi broadcast.

Spostamenti in planimetria					
	Differenze (m)	Prova 1	Prova 2	Prova 3	Prova 4
V.R.S 100m	minimo	0,000	0,000	0,000	0,000
	massimo	0,009	0,012	0,009	0,001
	medio	0,002	0,003	0,003	0,001
V.R.S 1000m	minimo	0,000	0,000	0,000	0,000
	massimo	0,013	0,012	0,009	0,001
	medio	0,003	0,003	0,003	0,001

Tabella 26 – Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli trovati

SPOSTAMENTI	V.R.S 100m	Effettuati (m)	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
		Trovati (m)	0,003	0,005	0,005	0,003	0,005
		Differenza (m)	0,001	0,003	0,003	0,001	0,003
	V.R.S 1000m	Effettuati (m)	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
		Trovati (m)	0,003	0,004	0,007	0,003	0,005
		Differenza (m)	0,001	0,002	0,005	0,001	0,003

Tabella 27 – Risultati ottenuti per gli spostamenti effettuati nella prova 5, con effemeridi broadcast

SPOSTAMENTI	V.R.S 100m	Effettuati (m)	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
		Trovati (m)	0,003	0,004	0,003	0,003	0,005
		Differenza	0,001	0,002	0,001	0,001	0,003
	V.R.S 1000m	Effettuati (m)	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
		Trovati (m)	0,003	0,004	0,005	0,003	0,005
		Differenza	0,001	0,002	0,003	0,001	0,003

Tabella 28 – Risultati ottenuti per gli spostamenti effettuati nella prova 5, con effemeridi precise

<b>Prova 5 – Spostamenti appartenenti alla classe di velocità “slow”</b>			
	<b>Differenze (m)</b>	<b>Differenze con effemeridi broadcast (m)</b>	<b>Differenze con effemeridi precise (m)</b>
<b>V.R.S 100m</b>	minimo	0,001	0,001
	massimo	0,003	0,003
	medio	0,002	0,002
<b>V.R.S 1000m</b>	minimo	0,001	0,001
	massimo	0,005	0,003
	medio	0,002	0,002

*Tabella 29 – Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli trovati per la prova 5*

<b>Spostamenti in planimetria – SQM (m)</b>						
	<b>Prova 1</b>	<b>Prova 2</b>	<b>Prova 3</b>	<b>Prova 4</b>	<b>Prova 5</b>	
					<b>Effemeridi broadcast</b>	<b>Effemeridi precise</b>
<b>V.R.S 100m</b>	0,011	0,006	0,012	0,001	0,005	0,003
<b>V.R.S 1000m</b>	0,012	0,006	0,012	0,001	0,005	0,004

*Tabella 30 – Scarto quadratico medio*

### **6.1.2 Spostamenti in altimetria**

Dalle Figura 80 e Figura 81, dove sono presentati i risultati della prima prova, in altimetria, si osserva il fatto che non ci sono grosse differenze per le due V.R.S.

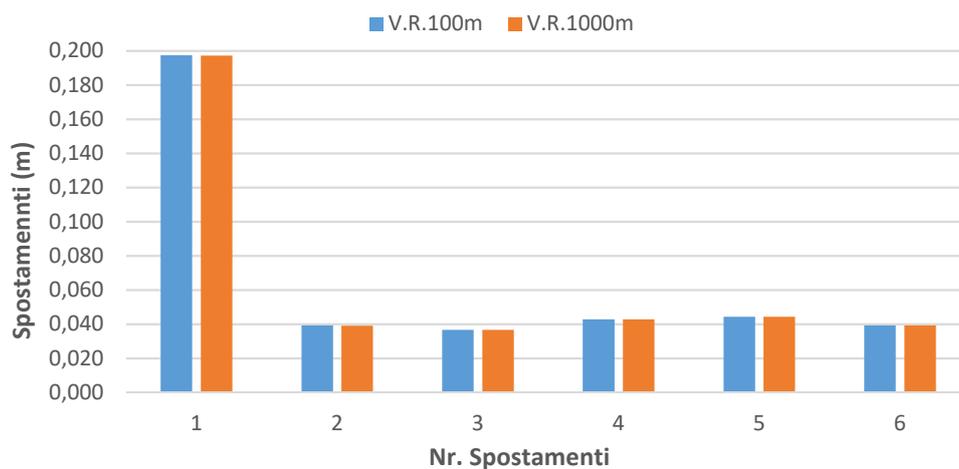


Figura 80 - Spostamenti trovati per la prova 1

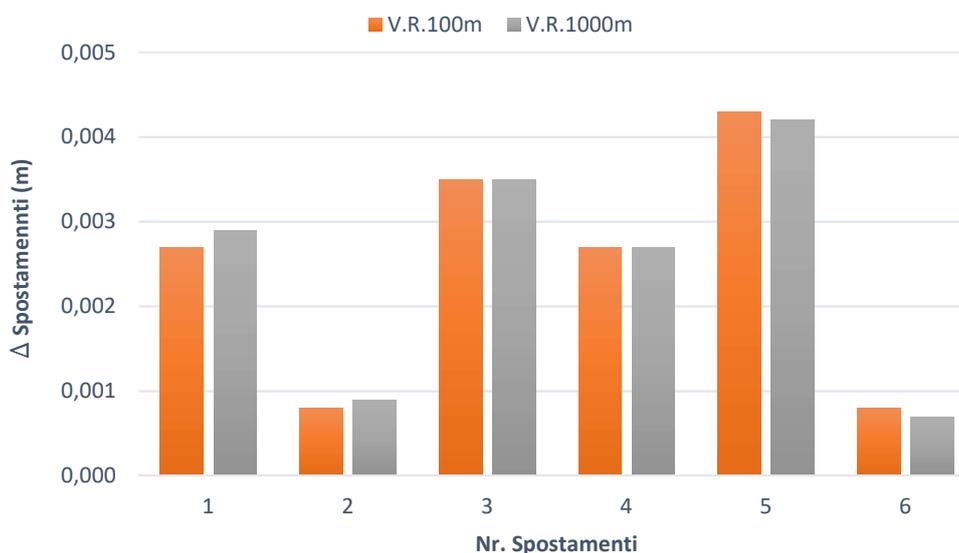


Figura 81 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati per la prova 1

Per la seconda prova, nella Figura 82 sono presentati gli spostamenti trovati in seguito al trattamento del dato. In Figura 83 sono presentate le differenze fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati, dove si nota il fatto che le differenze fra le due V.R.S. sono piccole, al di sotto del millimetro.

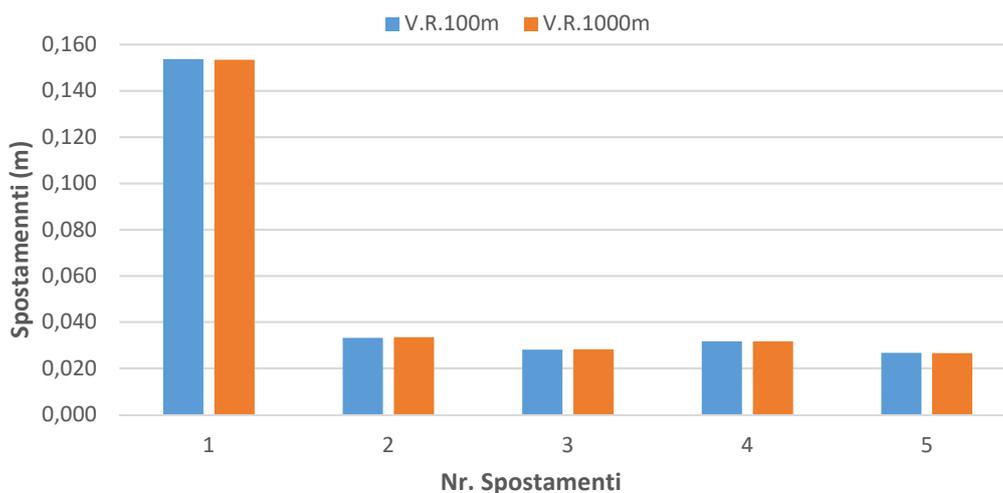


Figura 82 - Spostamenti trovati per la prova 2

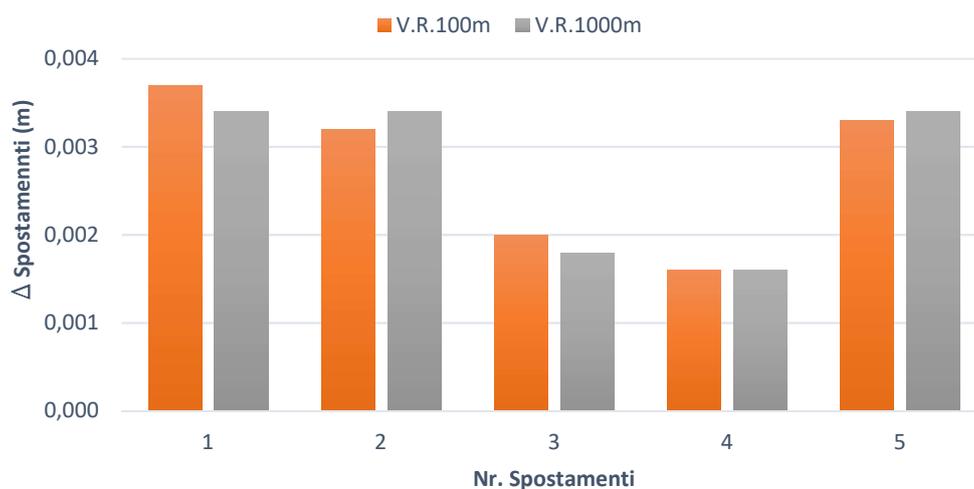


Figura 83- Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati per la prova 2

Per la terza prova in altimetria, nella Figura 84 sono presentati gli spostamenti trovati per le due V.R.S. Dalla Figura 85, dove sono rappresentate le differenze fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati, emerge il fatto che la differenza fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati in seguito al trattamento del dato in modalità statica con LGO, è maggiore per V.R.S. posta a 100m.

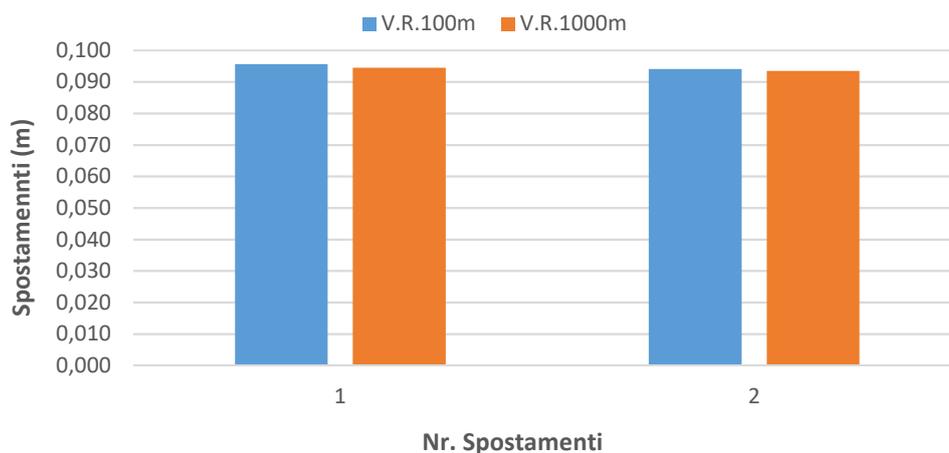


Figura 84 - Spostamenti trovati per la prova 3

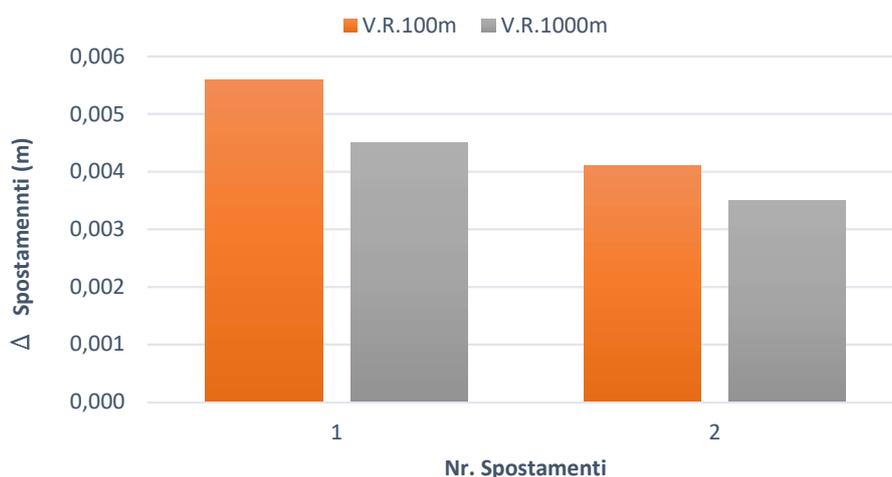


Figura 85 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati per la prova 3

Nella quarta prova in altimetria, gli spostamenti appartengono alla categoria “slow” come classe di velocità, dove nella Figura 86 sono rappresentati gli spostamenti trovati per le due V.R.S. Anche in questo caso, come per la planimetria, si riscontra il problema del rumore del segnale, dove, nella Figura 87 si osserva il fatto che le differenze fra gli spostamenti trovati in seguito al trattamento del dato e gli spostamenti realmente effettuati, arrivano anche a quasi 0,01m, che è più grande dello spostamento stesso, per cui risulta difficile se non impossibile distinguere il rumore dallo spostamento stesso e determinare l’entità dello spostamento. Allo stesso tempo, dalla Figura 87 si osserva il fatto che non ci sono differenze fra le due V.R.S.

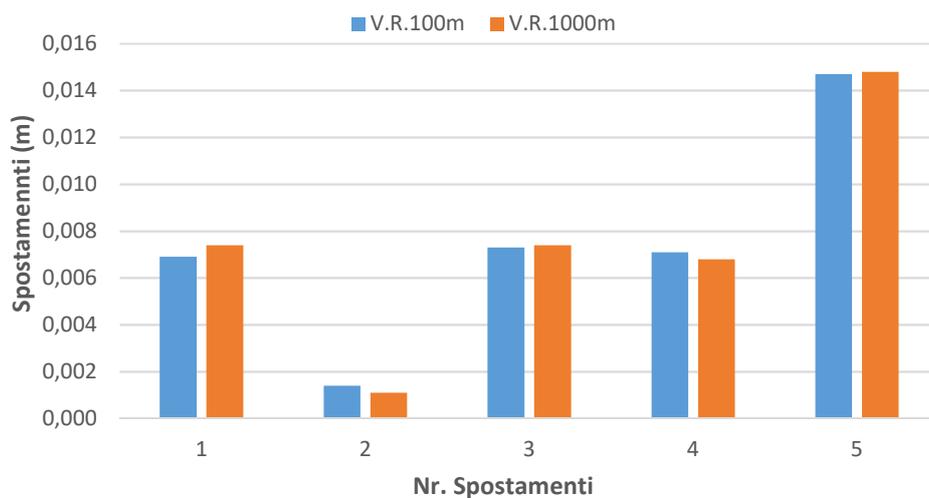


Figura 86 - Spostamenti trovati per la prova 4

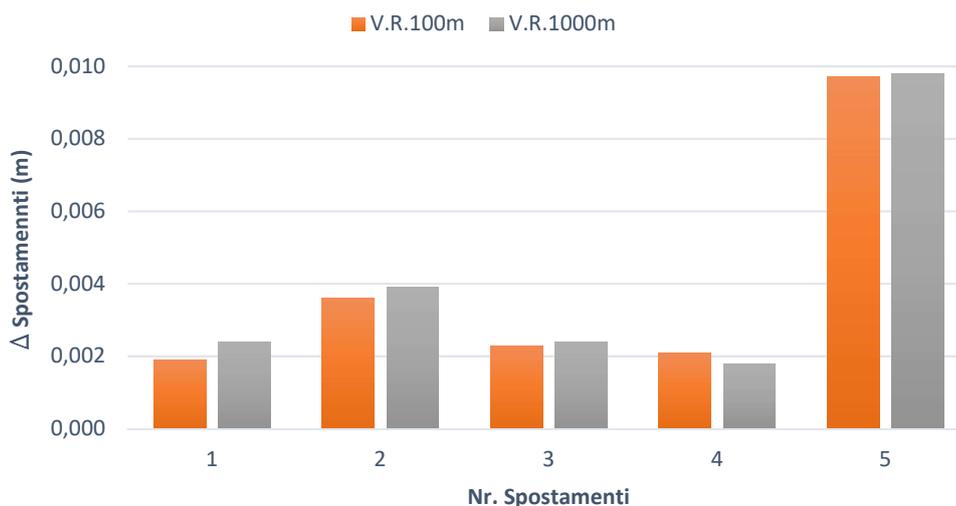


Figura 87 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati per la prova 4

Nella quinta prova in altimetria, gli spostamenti effettuati appartengono alla categoria "slow" come classe di velocità secondo Varnes e si riscontra lo stesso problema del rumore del segnale e si è cercato lo stesso approccio come per la planimetria, ovvero, processare il dato in LGO anche con le effemeridi precise. Le differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli risultati dopo il trattamento del dato vanno da un minimo di 0,002m ad un massimo di 0,014m, per il processamento con le effemeridi broadcast, e da un minimo di 0,000m ad un massimo di 0,009m, dove si può osservare, anche in questo caso, un leggero miglioramento del processamento con le effemeridi precise. Gli scarti quadratici medi sono di 0,007m per entrambe le V.R.S. per il trattamento con le effemeridi broadcast, di 0,003 per V.R.S. a 100m e di 0,004m per V.R.S. a 1.000m, per il trattamento del dato con effemeridi

precise. Si nota il fatto che, cambiando il tipo di effemeridi usate nel trattamento dati, non comporta nessun miglioramento, per quanto riguarda la differenza fra gli spostamenti trovati rispetto a quelli effettuati.

Usando i due tipi di trattamento, con le effemeridi broadcast e le effemeridi precise si nota che la differenza fra lo spostamento trovato e quello effettuato risulta essere quasi uguale e maggiore dello spostamento stesso per cui, anche in questo caso risulta difficile se non impossibile distinguere le due quantità.

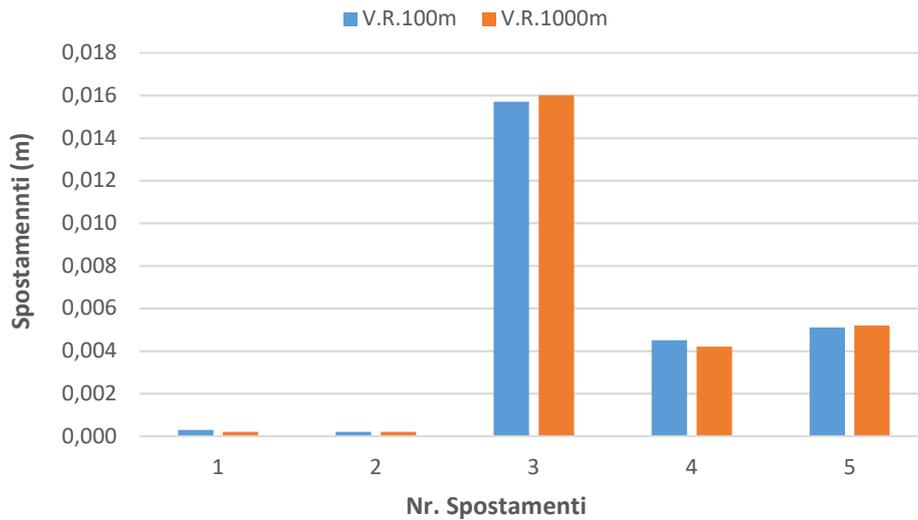


Figura 88 - Spostamenti trovati per la prova 5, con trattamento di dato utilizzando le effemeridi broadcast

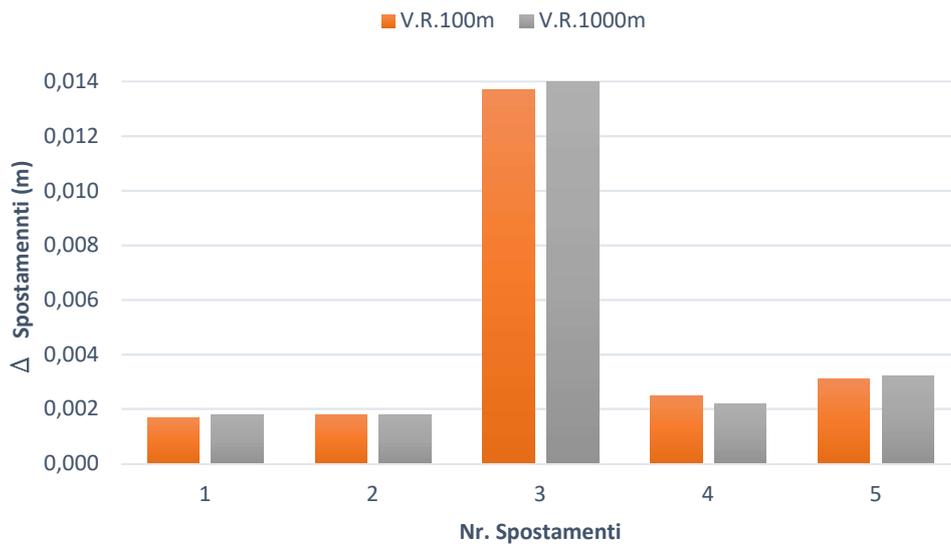


Figura 89 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati la prova 5, con il trattamento del dato utilizzando le effemeridi broadcast

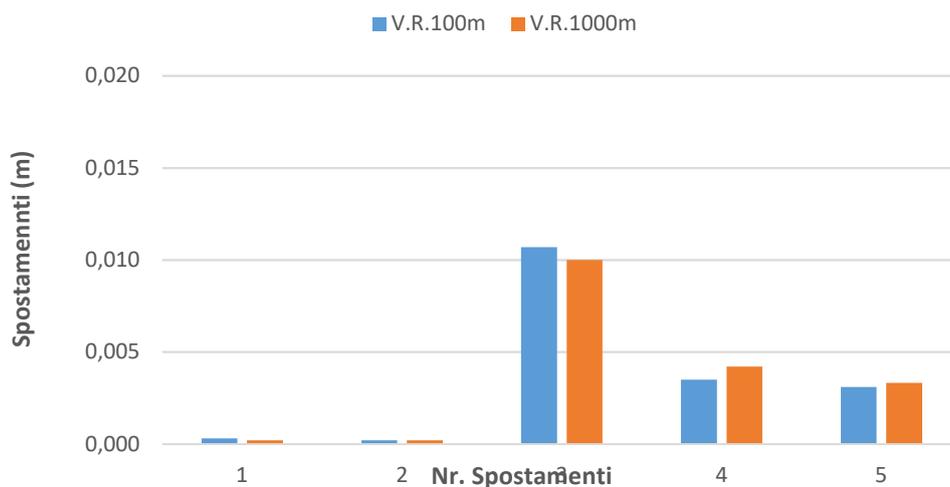


Figura 90 - Spostamenti trovati per la prova 5, con il trattamento del dato utilizzando le effemeridi precise

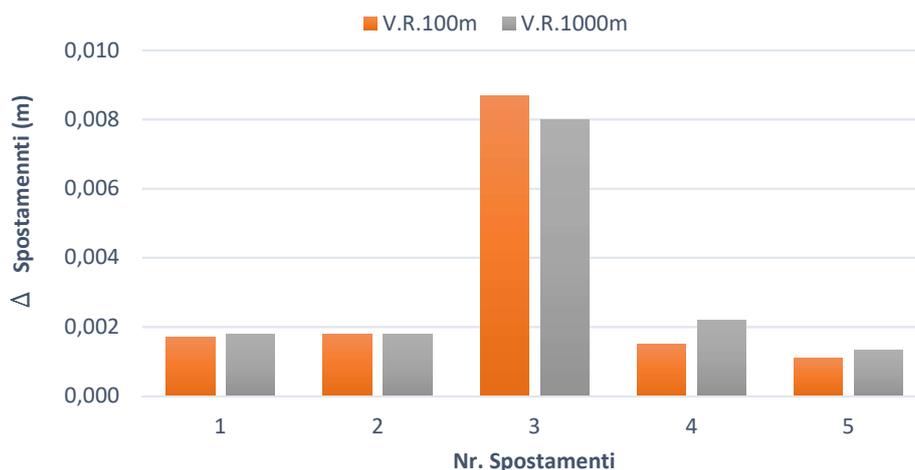


Figura 91 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati per la prova 5, con il trattamento di dato utilizzando le effemeridi precise

SPOSTAMENTI	V.R.S100m	Effettuati (m)	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
		Trovati (m)	0,000	0,000	0,016	0,005	0,005
		Differenza (m)	0,002	0,002	0,014	0,003	0,003
	V.R.S1000m	Effettuati (m)	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
		Trovati (m)	0,000	0,000	0,016	0,004	0,005
		Differenza (m)	0,002	0,002	0,014	0,002	0,003

Tabella 31 – Risultati ottenuti per gli spostamenti effettuati nella quinta prova, con le effemeridi broadcast

<b>SPOSTAMENTI</b>	<b>V.R.S100m</b>	<b>Effettuati (m)</b>	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
		<b>Trovati (m)</b>	0,000	0,000	0,011	0,004	0,003
		<b>Differenza</b>	0,002	0,002	0,009	0,002	0,001
	<b>V.R.S1000m</b>	<b>Effettuati (m)</b>	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
		<b>Trovati (m)</b>	0,000	0,000	0,010	0,004	0,003
		<b>Differenza</b>	0,002	0,002	0,008	0,002	0,001

*Tabella 32 – Risultati ottenuti per gli spostamenti effettuati nella quinta prova”, con le effemeridi precise*

<b>Spostamenti in altimetria</b>					
	<b>Differenze (m)</b>	<b>Prova 1</b>	<b>Prova 2</b>	<b>Prova 3</b>	<b>Prova 4</b>
<b>V.R.S 100m</b>	<b>minimo</b>	0,001	0,002	0,004	0,004
	<b>massimo</b>	0,004	0,004	0,006	0,010
	<b>medio</b>	0,002	0,003	0,005	0,002
<b>V.R.S 1000m</b>	<b>minimo</b>	0,001	0,002	0,004	0,004
	<b>massimo</b>	0,004	0,003	0,005	0,010
	<b>medio</b>	0,002	0,003	0,005	0,003

*Tabella 33 – Risultati ottenuti per gli spostamenti in altimetria*

<b>Prova 5 –Spostamenti appartenenti alla classe di velocità “slow”</b>			
	<b>Differenze (m)</b>	<b>Differenze con effemeridi broadcast (m)</b>	<b>Differenze con effemeridi precise (m)</b>
<b>V.R.S 100m</b>	<b>minimo</b>	0,002	0,002
	<b>massimo</b>	0,014	0,009
	<b>medio</b>	0,003	0,002
<b>V.R.S 1000m</b>	<b>minimo</b>	0,002	0,002
	<b>massimo</b>	0,014	0,008
	<b>medio</b>	0,003	0,002

*Tabella 34 – Differenze fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati per gli spostamenti della quinta prova*

Spostamenti in altimetria - SQM (m)						
	Prova 1	Prova 2	Prova 3	Prova 4	Prova 5	
					Effemeridi broadcast	Effemeridi precise
V.R.S 100m	0,006	0,006	0,007	0,004	0,010	0,007
V.R.S 1000m	0,005	0,006	0,006	0,005	0,010	0,007

Tabella 35 – Scarto quadratico medio per gli spostamenti in altimetria

## 6.2 Trattamento dei dati in modalità cinematica

Per questo tipo di trattamento, il programma ha generato una soluzione per ogni secondo del dato acquisito. Il file con dei risultati generati è stato trasferito in excel, per individuare l'entità degli spostamenti.

Per ogni classe di spostamento eseguito e per ogni tipo di ricevitore e antenna utilizzati sono state creati dei progetti nel programma LGO. Da tutte le soluzioni, emerge il fatto che solo per gli spostamenti eseguiti con ricevitore e antenna geodetica il programma è in grado di fissare l'ambiguità di fase e di avere un dato attendibile.

Di seguito sono presentati i grafici generati per ogni prova, con gli spostamenti trovati per le due V.R.S. e le differenze fra gli spostamenti eseguiti e quelli trovati, in seguito al processamento dei dati con LGO in modalità cinematica.

Per i grafici contenenti l'entità degli spostamenti, dato che per le due V.R.S. sono presentati gli stessi spostamenti, si presenta solo la soluzione generata dal LGO, per la V.R.S. posta a 100m.

Per i grafici che rappresentano le differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli trovati, tutte le differenze sono in valore assoluto.

### 6.2.1. Spostamenti appartenenti alla categoria "rapid" come classe di velocità, secondo Varnes – prova 1

Nella Figura 92 sono stati presentati tutte le soluzioni generate dal LGO per la prima prova in planimetria. Per quanto riguarda le differenze fra gli spostamenti reali e quelli generati come soluzione dal programma, Figura 93, si può osservare che il dato è sensibilmente simile per le due V.R.S.

- Spostamenti in planimetria

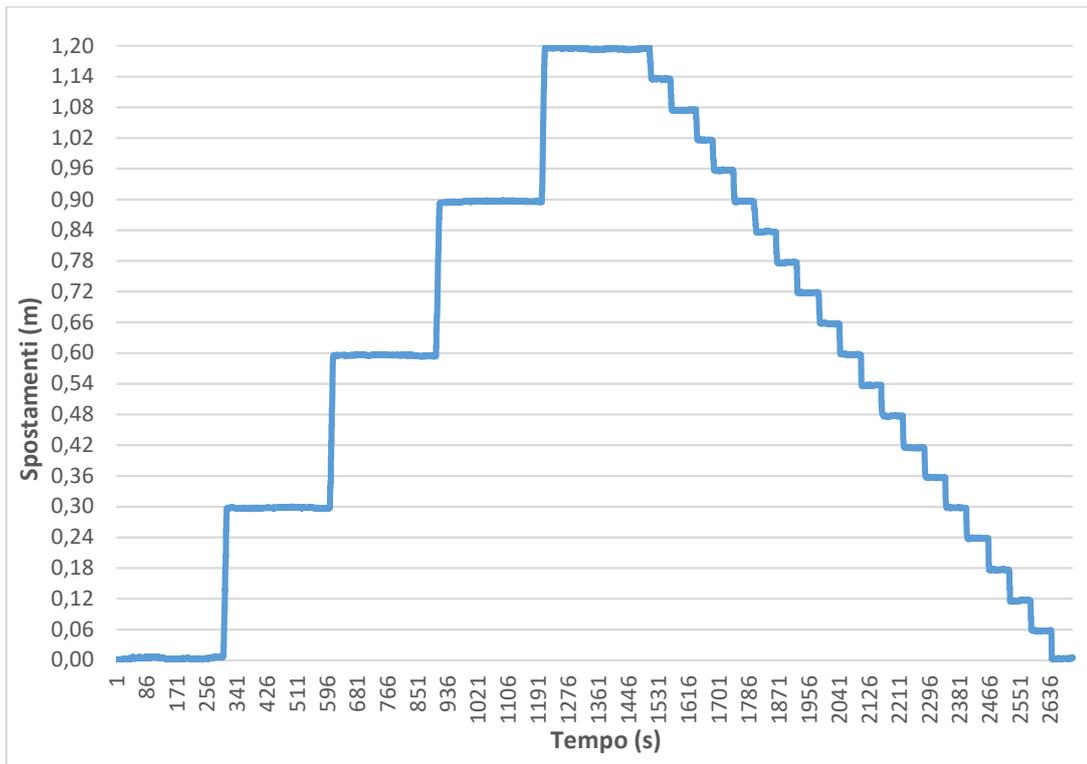


Figura 92 - Spostamenti trovati per gli spostamenti effettuati nella prima prova, per la planimetria

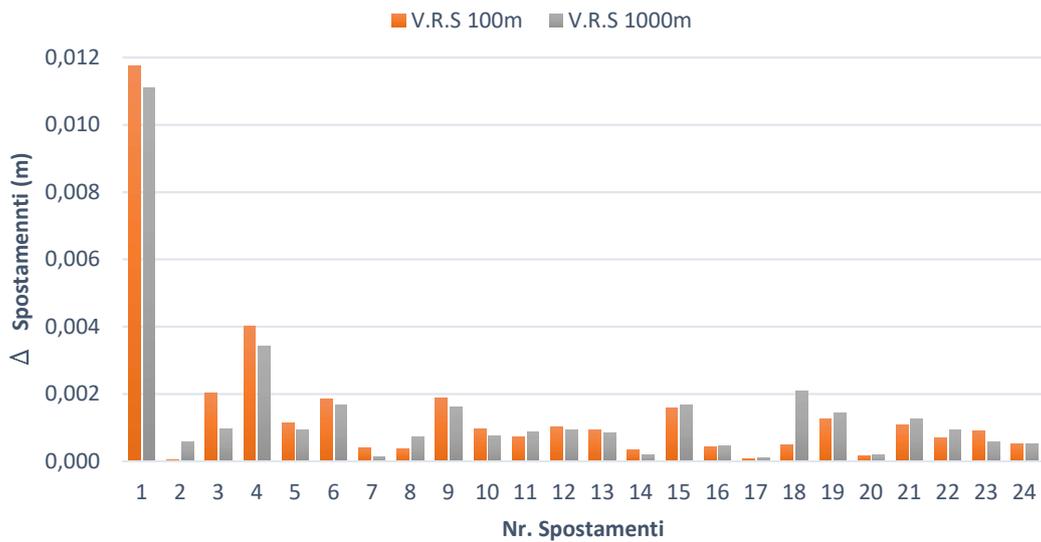


Figura 93 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati per la prima prova, in planimetria

- Spostamenti in altimetria

Gli spostamenti effettuati nella prima prova in altimetria, dove nella Figura 94 sono rappresentate le soluzioni generate dal software, si nota il fatto che tutti gli spostamenti sono stati individuati.

Nella Figura 95 sono rappresentate tutte le differenze fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati, dove si può notare che la soluzione migliore, ovvero le differenze minori sono state riscontrate con V.R.S posta a 100m.

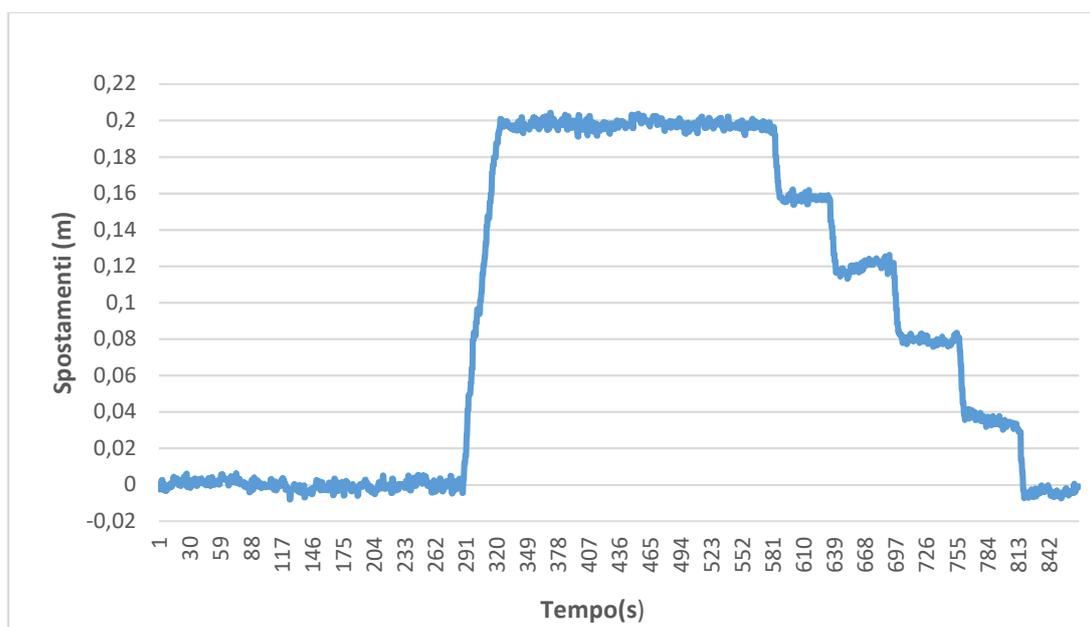


Figura 94 - Spostamenti trovati per gli spostamenti della prima prova, in altimetria

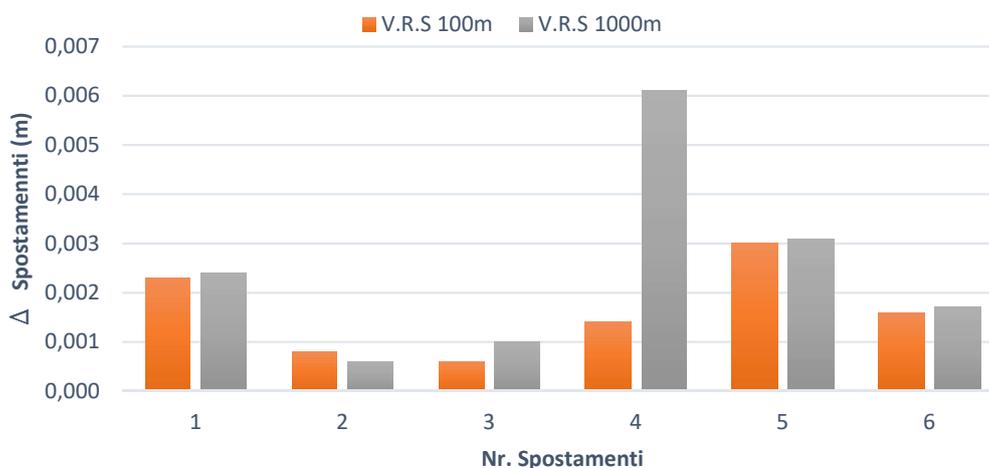


Figura 95 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati per la prima prova, in altimetria

## 6.2.2 Spostamenti appartenenti alla categoria tra “rapid” e “moderate” come classe di velocità, secondo Varnes – prova 2

- Spostamenti in planimetria

Gli spostamenti della seconda prova appartengono alla categoria tra “moderate” e “rapid” come classe di velocità secondo Varnes, per gli spostamenti effettuati in planimetria, si nota il fatto che sono stati individuati tutti.

Le differenze fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati, in planimetria, sono rappresentate nella Figura 97, dove si nota il fatto che il dato migliore è ottenuto con V.R.S posta a 100m, con una differenza massima di quasi 0,003m.

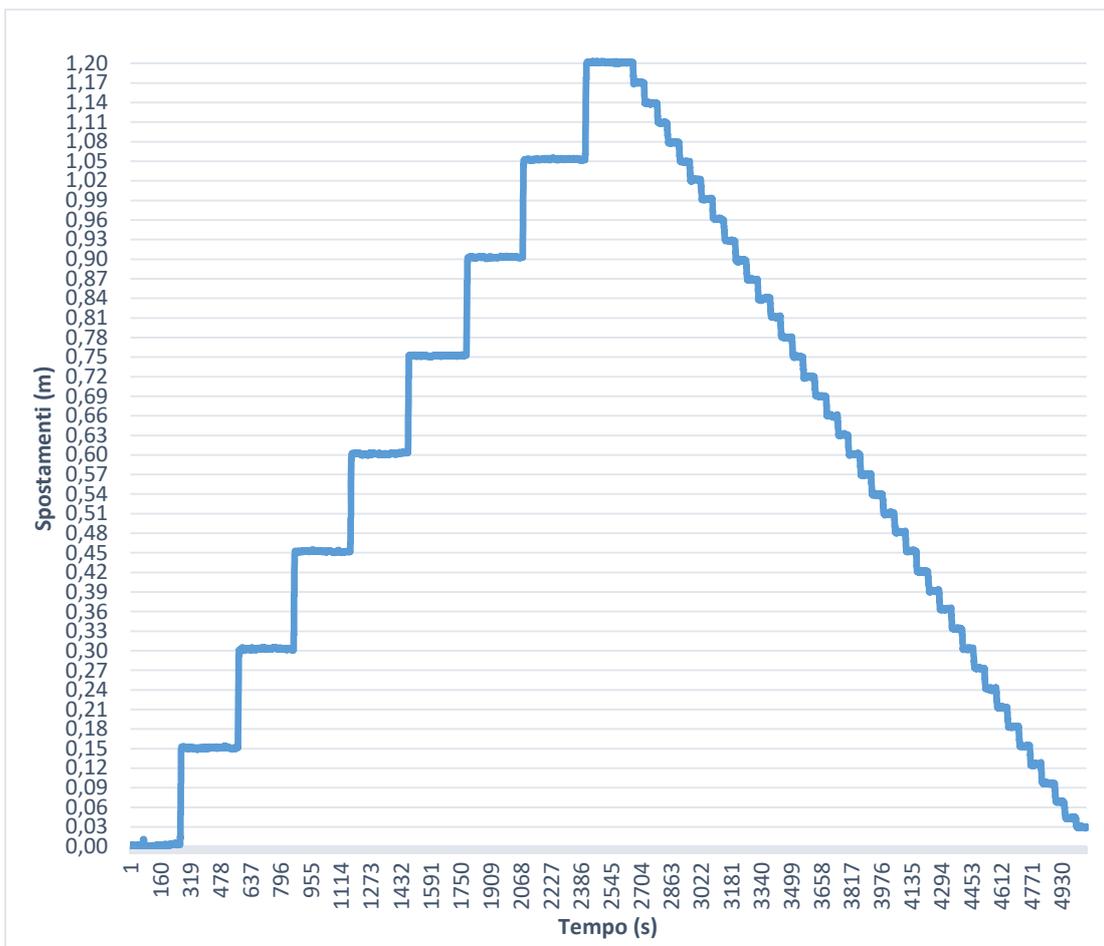


Figura 96 - Spostamenti trovati per la prima prova, in planimetria

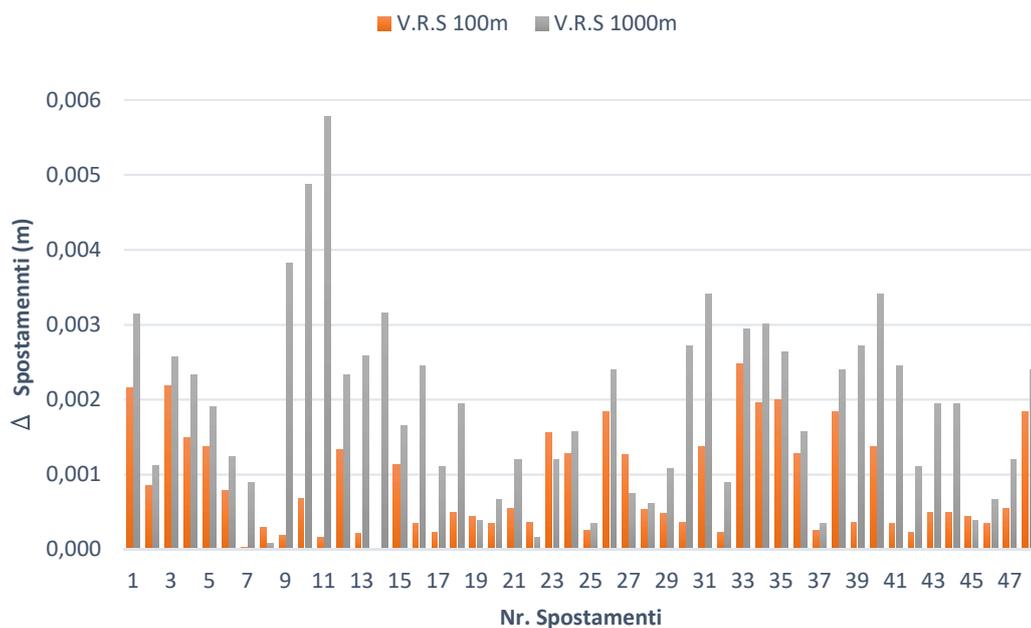


Figura 97 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati per la prima prova, in planimetria

- Spostamenti in altimetria

Nella Figura 98 sono rappresentati gli spostamenti trovati in seguito al trattamento del dato in modalità cinematica con l'ausilio del software LGO, per gli spostamenti effettuati in altimetria, dove si osserva il fatto che tutti gli spostamenti risultano individuati. Nella Figura 99 sono rappresentate le differenze fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati, in altimetria, dove si osserva che non ci sono differenze fra le due V.R.S, ad eccezione del primo spostamento per V.R.S a 100m, e del quarto spostamento, per V.R.S a 1000m dove, risultano essere nulle.

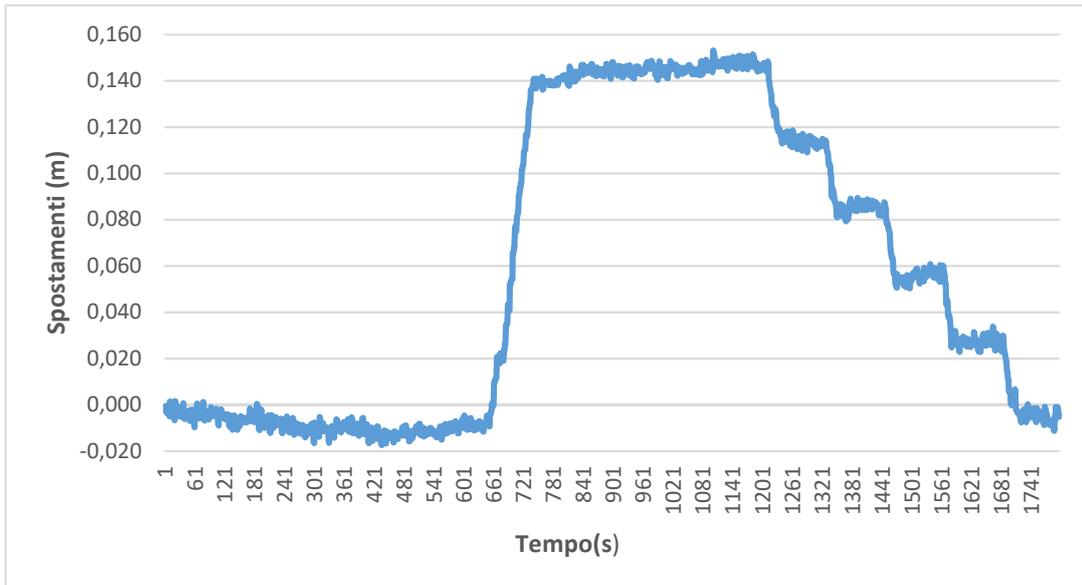


Figura 98 - Spostamenti trovati per la seconda prova, in altimetria

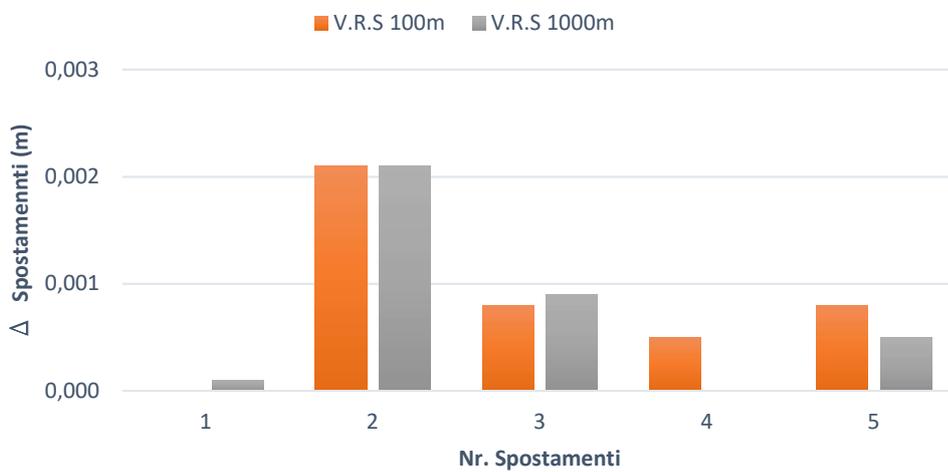


Figura 99 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati per la seconda prova, in altimetria

### 6.2.3 Spostamenti appartenenti alla categoria “moderate” come classe di velocità, secondo Varnes – prova 3

- Spostamenti in planimetria

Nella Figura 100 sono rappresentati gli spostamenti trovati in seguito al trattamento del dato in modalità cinematica con il software LGO, per gli spostamenti effettuati in planimetria, dove si nota che tutti sono stati individuati. Nella Figura 101 sono rappresentate le differenze fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati, dove si nota un risultato migliore trovato con V.R.S a 100m, dove la massima differenza risulta essere di 0,004m, invece per V.R.S a 1000m, la differenza supera anche 0,01m.

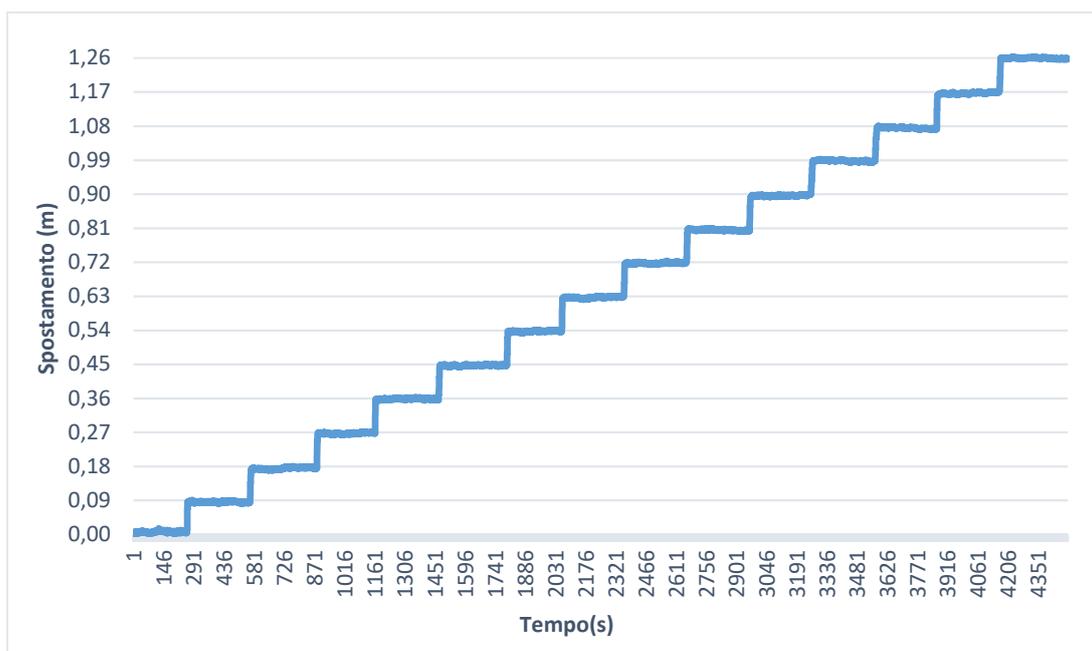


Figura 100 - Spostamenti trovati per la terza prova, in planimetria

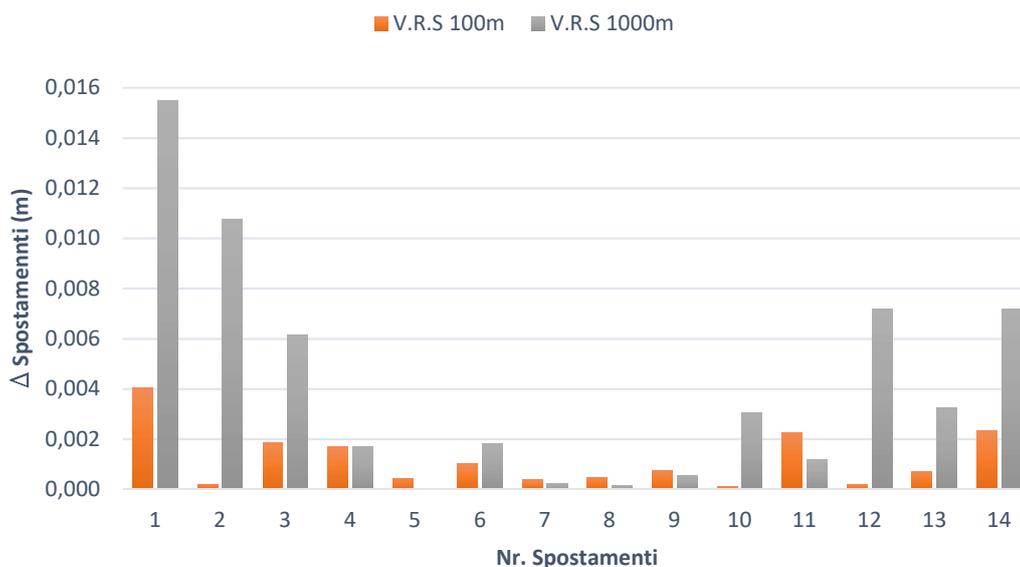


Figura 101 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati per la terza prova, in planimetria

- Spostamenti in altimetria

Nel Figura 102 sono rappresentati gli spostamenti trovati in seguito al trattamento del dato, per gli spostamenti effettuati in altimetria dove si osserva il fatto che, il segnale ricevuto dai satelliti è abbastanza rumoroso, quindi può influire nelle differenze fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati, dove si nota il fatto che, per il secondo spostamento, arriva ad essere di 0,006m.

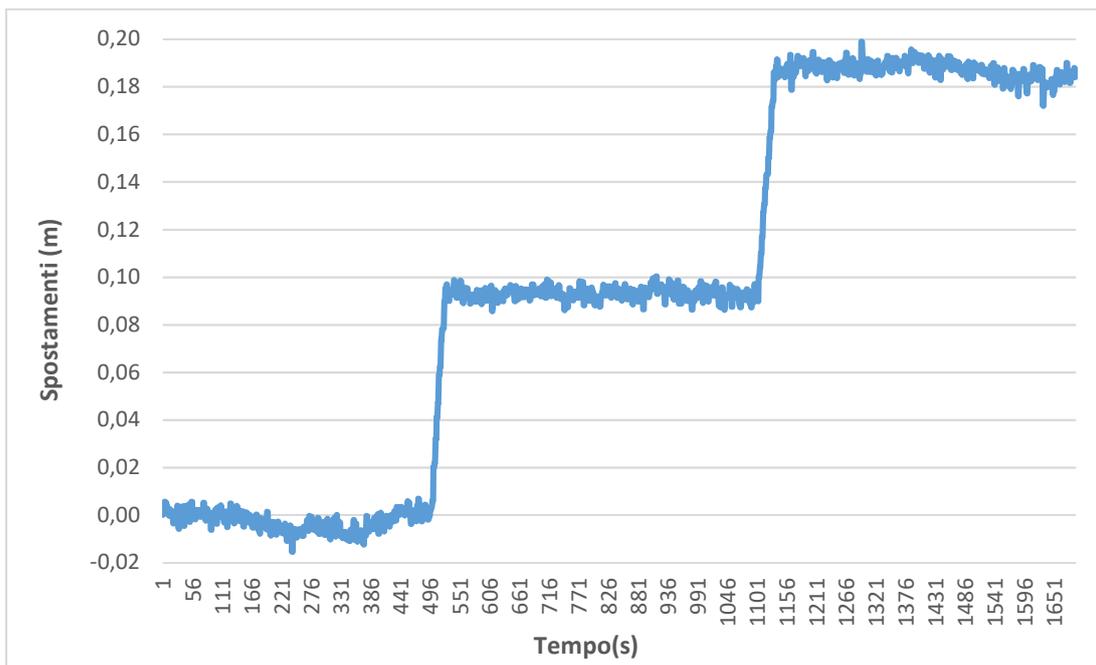


Figura 102 - Spostamenti trovati per la terza prova, in altimetria

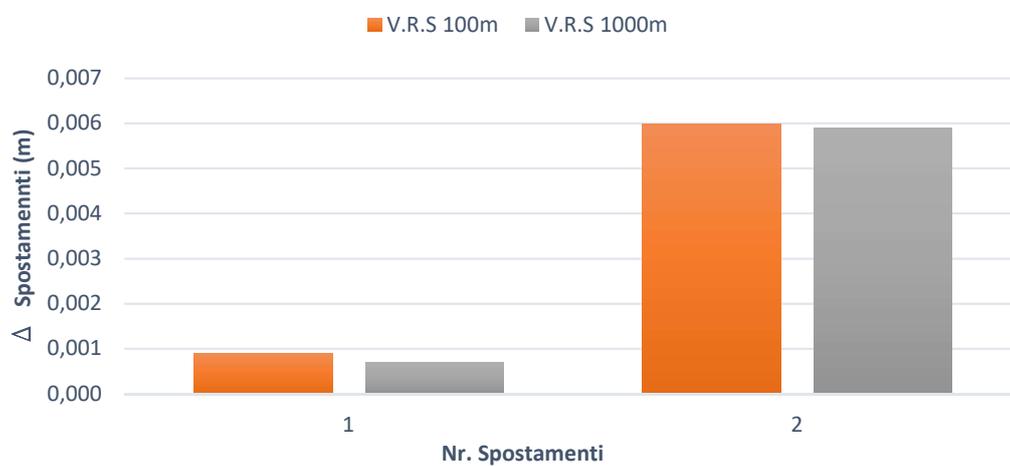


Figura 103 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati per la terza prova, in altimetria

#### **6.2.4 Spostamenti appartenenti alla categoria “slow” come classe di velocità, secondo Varnes – prova 4 e prova 5**

Nella Figura 104 sono rappresentati gli spostamenti appartenenti alla categoria “slow” come classe di velocità, 0,005m ogni 20 minuti – prova 4, in planimetria, per l’intero periodo di acquisizione dati. Dai file dei risultati, risulta che:

- l’ambiguità di fase è fissata e quindi la rete è compensata, per ciò, il dato può essere considerato attendibile;
- le costellazioni da cui il segnale è ricevuto, risultano essere sia GPS sia GLONASS, con un numero totale di satelliti che varia da 11 a 15, quindi sono soddisfatte le condizioni per il ricevimento di un segnale buono per essere processato, ma allo stesso tempo, essendo un ricevitore e un’antenna ad una sola frequenza e con gli spostamenti di 0.005m - entità molto piccola, il segnale non risulta essere stabilizzato;
- si nota il fatto che, nel periodo compreso fra il secondo 5500 e il secondo 6800, il software ha generato un dato di spostamento anche di 2 m;
- dal secondo 5600 alla fine, si osserva il fatto che i risultati del software indicano uno spostamento che varia da 0,25 a 0,35m, che risulta essere molto più grandi degli spostamenti realmente effettuati;

Nella Figura 106 sono rappresentati gli spostamenti appartenenti alla categoria “slow” come classe di velocità secondo Varnes, 0,005m ogni 20 minuti, in altimetria, per l’intero periodo di acquisizione dati. Nella fase di calcolo, per individuare gli spostamenti, tutti i picchi che presentano dei valori lontani dagli spostamenti effettuati, vanno eliminati.

I dati forniti dal software, indicano:

- un numero di satelliti che variano da 10 a 15, il segnale ricevuto proviene da due costellazioni di satelliti, GPS e GLONASS;
- l’ambiguità di fase risulta essere fissata e di conseguenza la rete risulta essere compensata;
- dalla Figura 106 risulta un periodo compreso tra i secondi 1800 e 2900 con spostamenti che variano da 0,2 a 0,5m;
- per il periodo dal secondo 3000 e fine tempo di acquisizione dati, si osserva che lo spostamento complessivo è di 0,04m rispetto ai 0,015m che sono realmente effettuati e ogni singolo spostamento non può essere individuato né quantificato.

Per gli spostamenti di 0,002m ogni 20 minuti – prova 5, sia in planimetria, che in altimetria, ovvero degli spostamenti appartenenti alla classe “slow” secondo Varnes, il software utilizzato per il trattamento dei dati, LGO, fissa l’ambiguità di fase e, con tutto ciò, come si può osservare dalle Figura 108 e Figura 109, lo spostamento non può essere individuato e quantificato. Anche in questo caso, il software indica un numero di satelliti disponibili che variano da 11 a 15 e il segnale ricevuto proviene dalle costellazioni GPS e GLONASS.

Dalle considerazioni sopra presentate, risulta il fatto che, per questa categoria di spostamenti, i test vanno fatti in modo diverso.

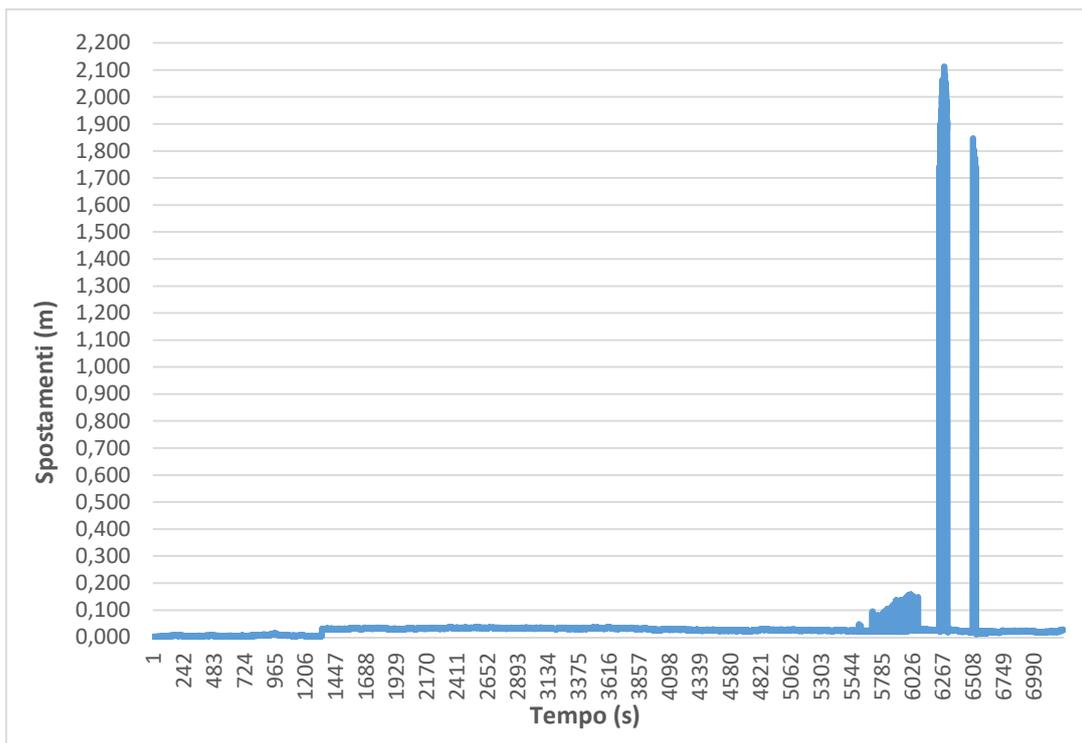


Figura 104 – Spostamenti per la quarta prova in planimetria per l'intero periodo di acquisizione dati,

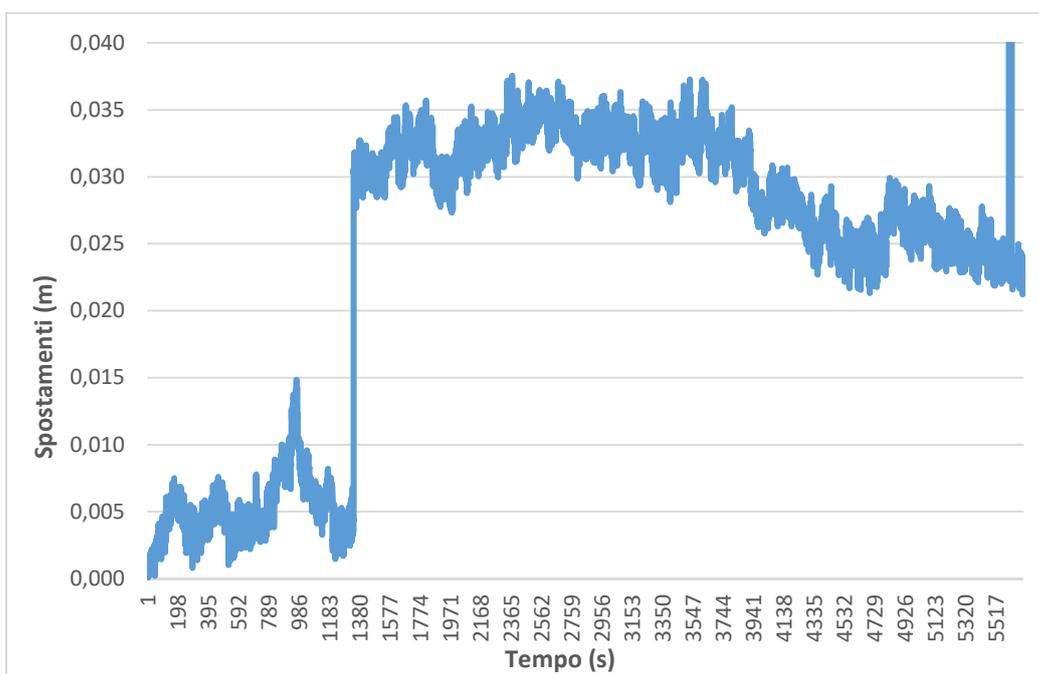


Figura 105 – Particolare degli spostamenti effettuati nella quarta prova in planimetria (secondo: dal 1 al 5600 di acquisizione)

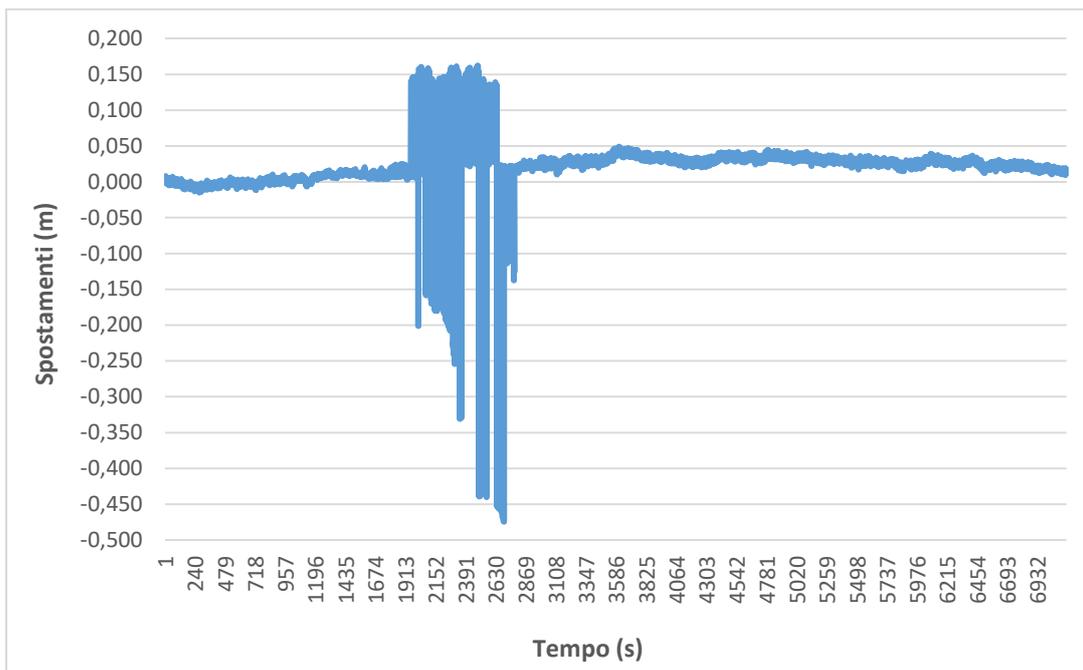


Figura 106– Spostamenti effettuati nella quinta prova, in altimetria

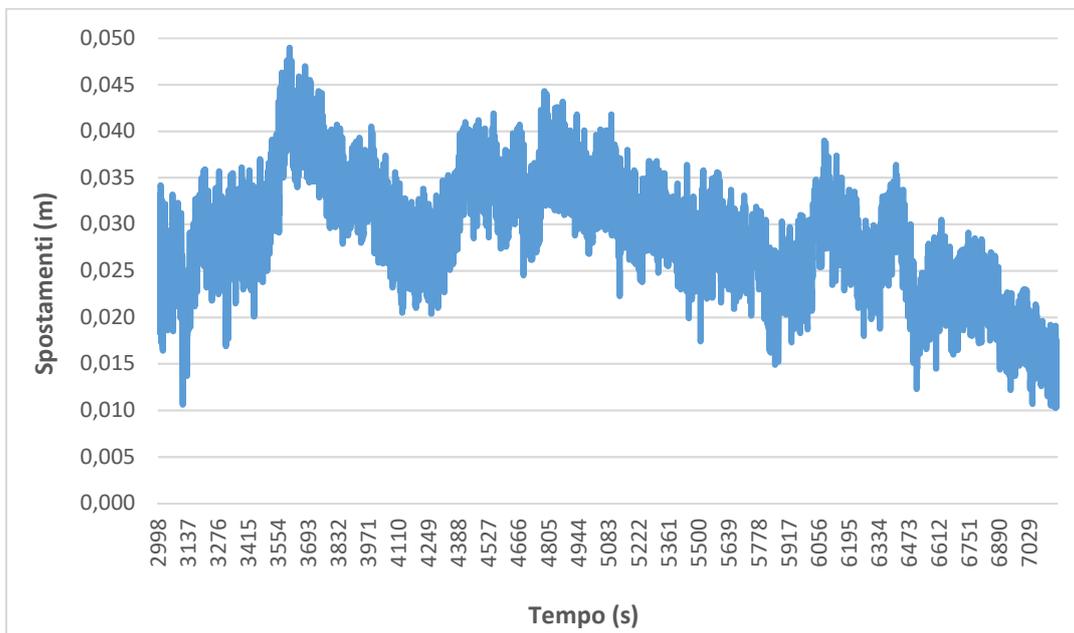


Figura 107 - Particolare degli spostamenti effettuati nella quarta prova, in altimetria (dal secondo 2990 alla fine della prova)

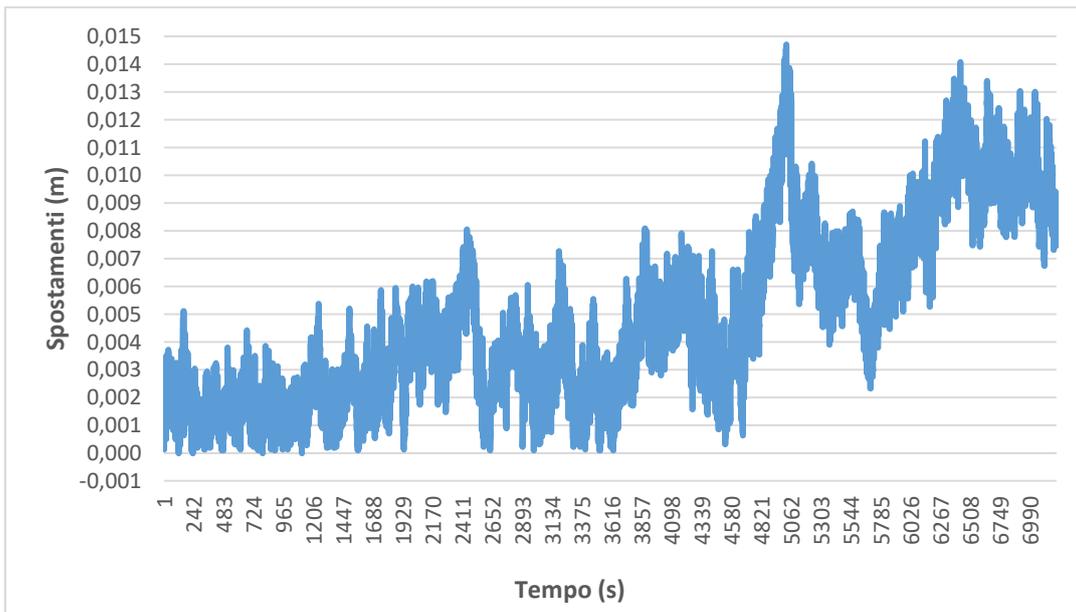


Figura 108 - Spostamenti effettuati nella quinta prova, in planimetria

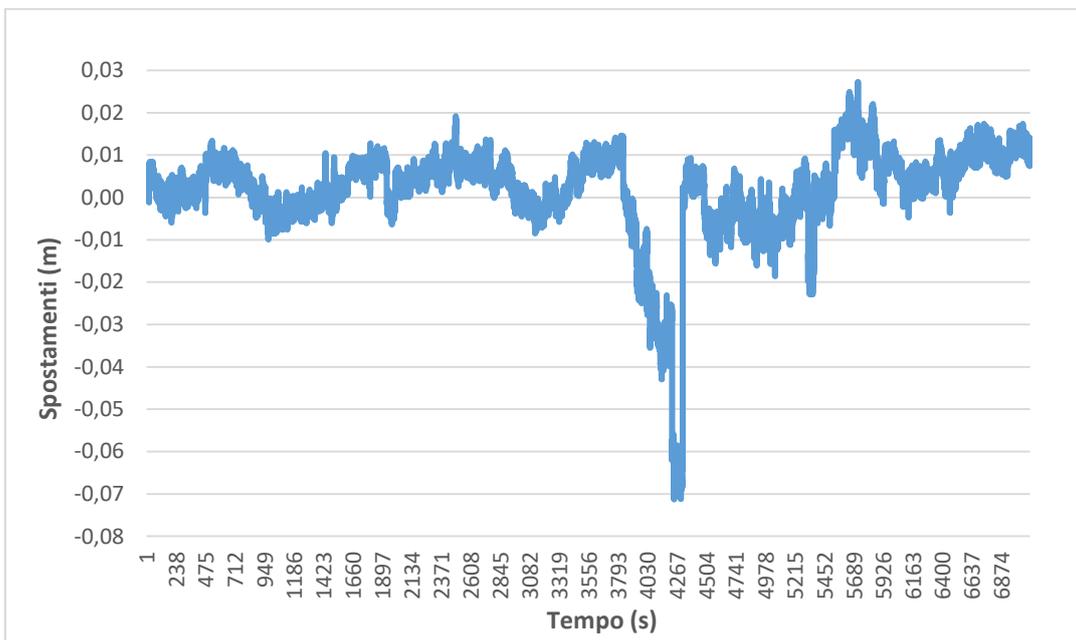


Figura 109 - Spostamenti effettuati nella quinta prova, in altimetria

<b>Spostamenti in planimetria</b>				
	<b>Differenze (m)</b>	<b>Prova 1</b>	<b>Prova 2</b>	<b>Prova 3</b>
<b>V.R.S 100m</b>	<b>minimo</b>	0,000	0,000	0,000
	<b>massimo</b>	0,012	0,002	0,004
	<b>medio</b>	0,001	0,001	0,001
<b>V.R.S 1000m</b>	<b>minimo</b>	0,000	0,000	0,000
	<b>massimo</b>	0,011	0,006	0,015
	<b>medio</b>	0,001	0,002	0,004

*Tabella 36 – Differenze fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati, in planimetria*

<b>Spostamenti in planimetria - SQM (m)</b>			
	<b>Prova 1</b>	<b>Prova 2</b>	<b>Prova 3</b>
<b>V.R.S 100m</b>	0,007	0,006	0,004
<b>V.R.S 1000m</b>	0,007	0,013	0,016

*Tabella 37 – Scarto quadratico medio per gli spostamenti in planimetria*

Nella Tabella 36 sono presentati i valori per le differenze fra gli spostamenti trovati in seguito al trattamento del dato con il software LGO, nei valori minimi, massimi e medi per le due V.R.S. Si nota il fatto che il dato migliore si è ottenuto con il V.R.S posta a 100m di distanza. Nella Tabella 37 sono presentati gli scarti quadratici medi relativi agli spostamenti effettuati nelle prime tre prove.

Per gli spostamenti appartenenti alla categoria “slow” come classe di velocità secondo Varnes, ovvero le prove 4 e 5, come si può osservare dai grafici relativi a questi spostamenti, non è stato possibile individuarli e stabilire la differenza fra lo spostamento trovato e quello realmente effettuato.

Nella Tabella 38 sono presenti le differenze fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati, per gli spostamenti effettuati nelle prime tre prove e si nota il fatto che i risultati sono sensibilmente uguali per le due V.R.S, tranne per gli spostamenti della prima prova, dove il risultato migliore si è ottenuto per V.R.S posta a 100.

Spostamenti in altimetria				
	Differenze (m)	Prova 1	Prova 2	Prova 3
V.R.S 100m	minimo	0,001	0,000	0,001
	massimo	0,003	0,002	0,006
	medio	0,002	0,001	0,003
V.R.S 1000m	minimo	0,001	0,000	0,001
	massimo	0,006	0,002	0,006
	medio	0,002	0,001	0,003

Tabella 38 – Differenze fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati per gli spostamenti in altimetria

Spostamenti in altimetria - SQM (m)			
	Prova 1	Prova 2	Prova 3
V.R.S 100m	0,004	0,002	0,005
V.R.S 1000m	0,006	0,002	0,005

Tabella 39 – Scarto quadratico medio per gli spostamenti in altimetri

### 6.3 Trattamento dei dati in modalità cinematica con RTK-lib

Nel trattamento dei dati in modalità cinematica, ovvero con una soluzione al secondo, il programma RTK-lib fornisce soluzioni separate per quanto riguarda le V.R.S., ovvero 2 soluzioni per V.R.S. posta a 100m – punto a e punto b- e altre 2 soluzioni per V.R.S. posta a 1.000m – punto a e punto b. Per la chiarezza della soluzione, di seguito, sono stati presentati i grafici, con le differenze fra gli spostamenti effettuati (imposti) e quelli effettivamente rilevati per ogni punto e per ogni tipo di antenna e ricevitore utilizzato. Dato

che i software elabora delle soluzioni diverse per le due baseline, ovvero punto a e punto b, sono presentati nei grafici separati.

### 6.3.1 Spostamenti appartenenti alla categoria “rapid” come classe di velocità, secondo Varnes – prova 1

- Spostamenti in planimetria

Per la prima prova in planimetria, effettuata con antenna e ricevitore Leica, dalla Figura 111 e dalla Figura 112 si nota il fatto che l’uniformità del dato fra le differenze degli spostamenti effettuati e quelli rilevati si ottiene per il punto b per le due V.R.S.

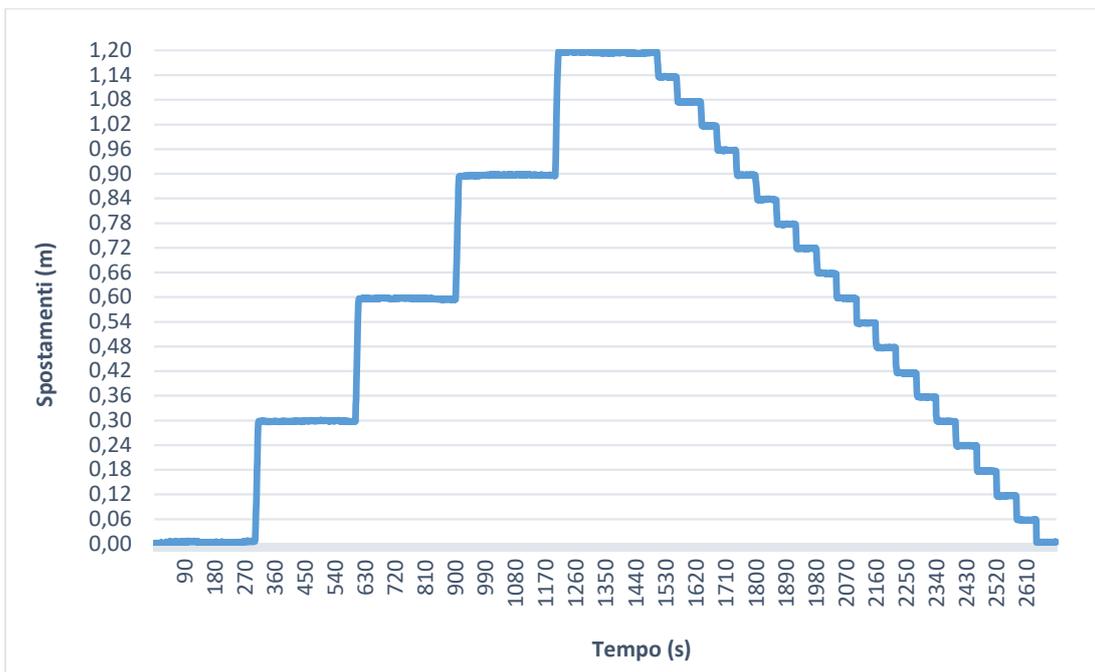


Figura 110 – Spostamenti per prova con antenna e ricevitore Leica, in planimetria

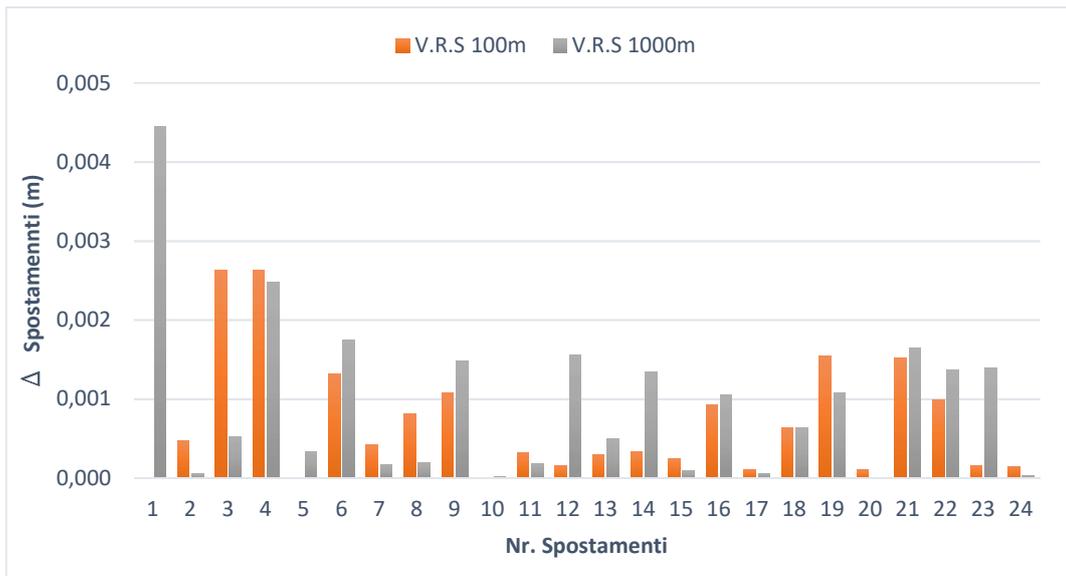


Figura 111 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna e ricevitore Leica - punto a, in planimetria

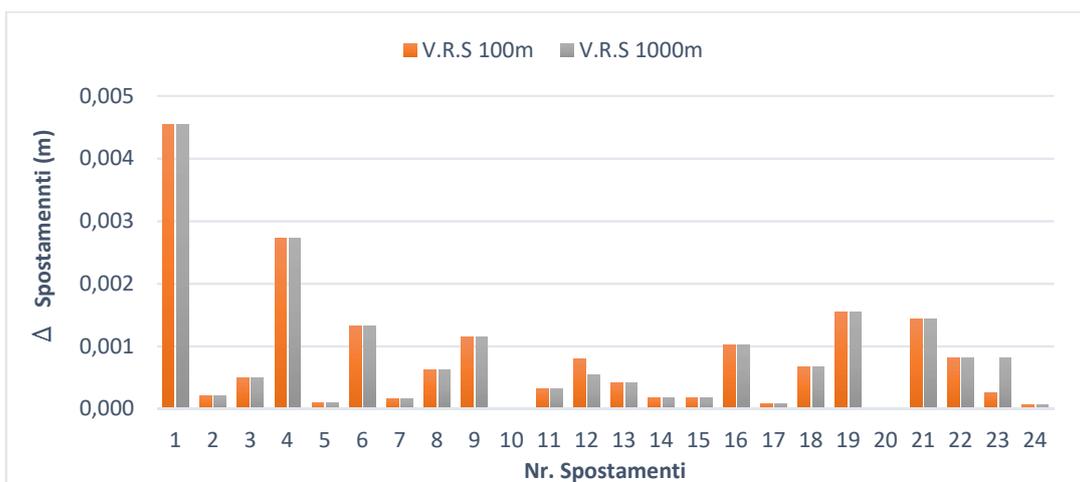


Figura 112 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna e ricevitore Leica - punto b, in planimetria

Dalla Figura 114 e dalla Figura 115, dove sono rappresentati i dati per il ricevitore U-Blox e antenna Leica, si nota il fatto che l'uniformità dei dati fra i due punti e fra le due V.R.S. poste rispettivamente a 100m ed a 1.000m, sono molto simili e presentano delle anomalie: uno degli spostamenti non è stato individuato, corrispondente al secondo 1732 e il fra il secondo 2410 e 2423 c'è un salto nel grafico, corrispondente ad una qualità del dato superiore ad uno, (vedi Figura 113) che nel calcolo dello spostamento è stato eliminato, non considerato attendibile e successivamente si è notato che quest'anomalia compare in un periodo di fermo dello strumento. Per tutte queste ragioni, nel calcolo per individuare gli spostamenti questa porzione di dato è stata eliminata.

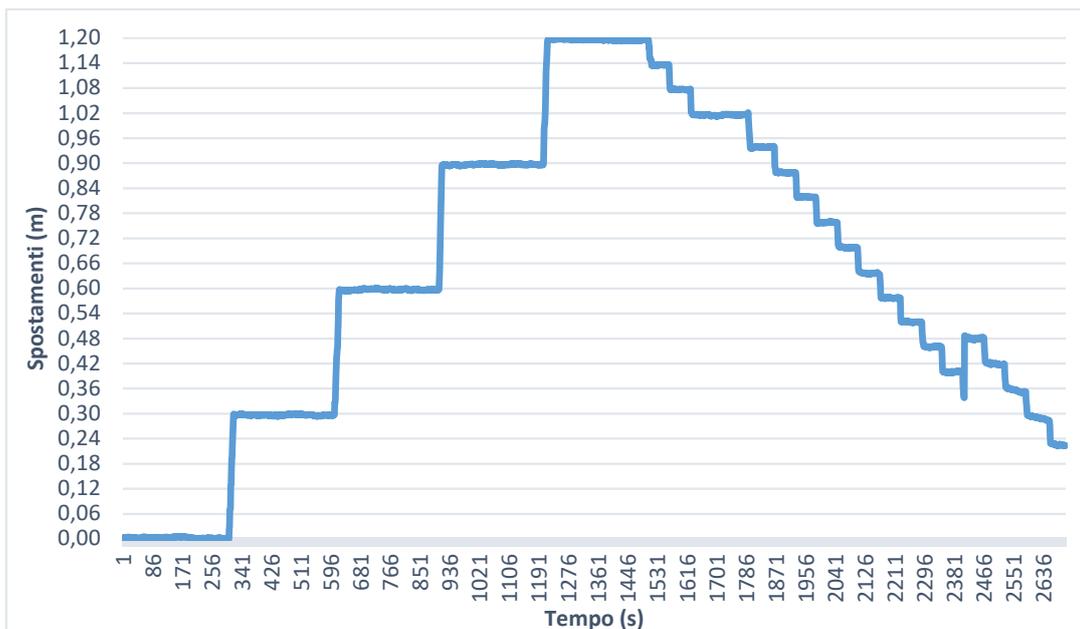


Figura 113 – Spostamenti per prova con antenna Leica e ricevitore U-Blox, in planimetria

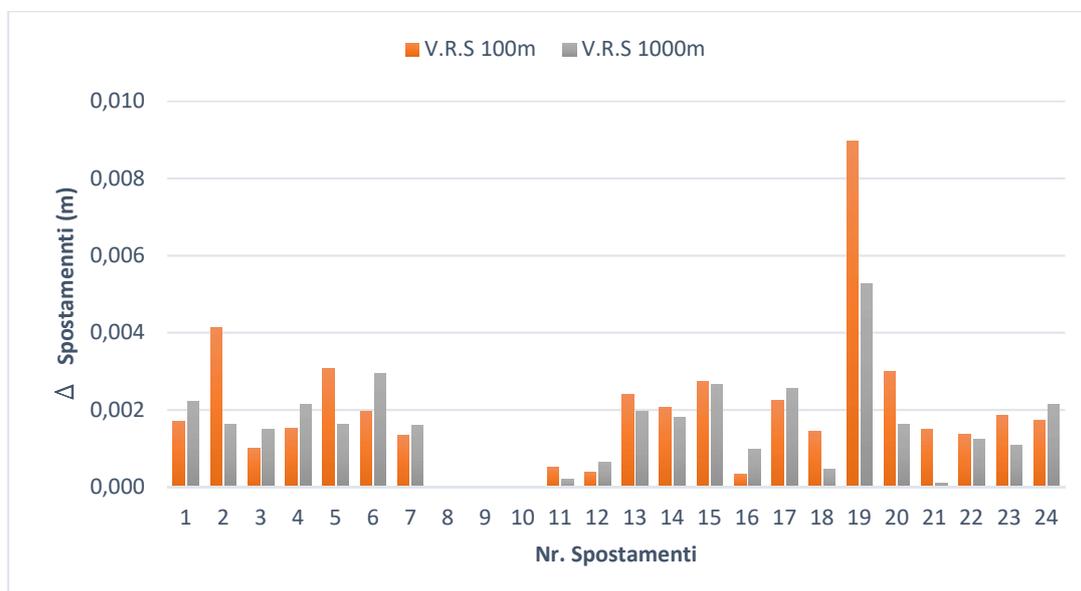


Figura 114 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna e ricevitore Leica e ricevitore U-Blox - punto a, in planimetria

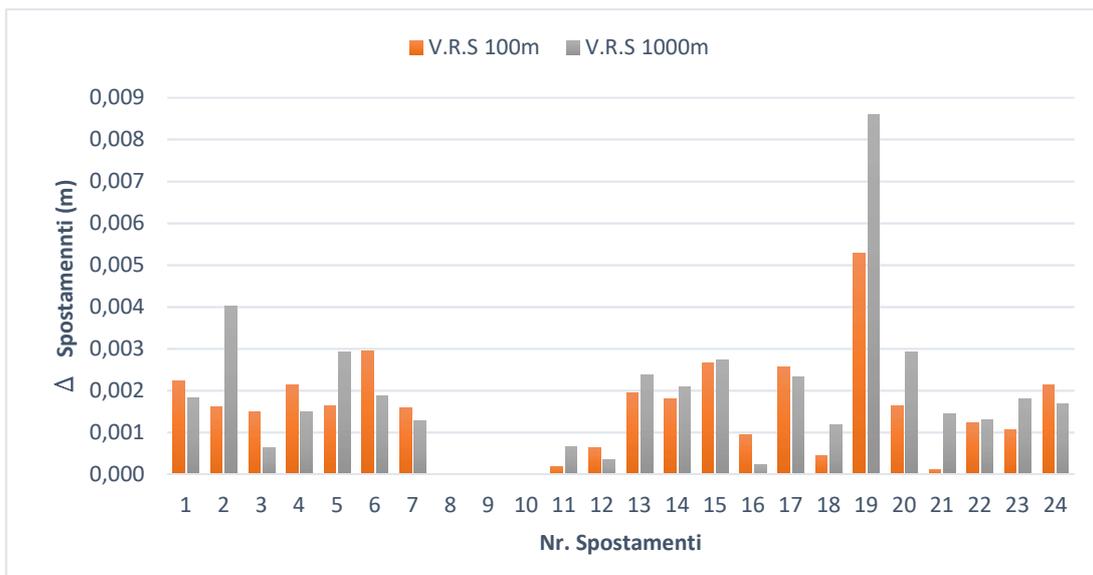


Figura 115 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna Leica e ricevitore U-Blox - punto b, in planimetria

La Figura 116, dove sono rappresentati gli spostamenti effettuati con antenna Garmin e ricevitore U-Blox, mette in evidenza il fatto che il software RTK lib è stato in grado di individuare tutti gli spostamenti effettuati.

Dalla Figura 117 e dalla Figura 118, dove sono rappresentati i risultati per gli spostamenti effettuati con ricevitore U-Blox e antenna Garmin, si nota il fatto che l'uniformità dei dati fra i due punti e fra le due V.R.S. Queste differenze, ad eccezione di un solo spostamento, il 9, che è di 0,024m, sono al di sotto del centimetro. L'ottavo spostamento effettuato non può essere quantificato, in quanto la qualità del dato è 2 ed i dati ottenuti non sono attendibili; per questa ragione, va eliminato.

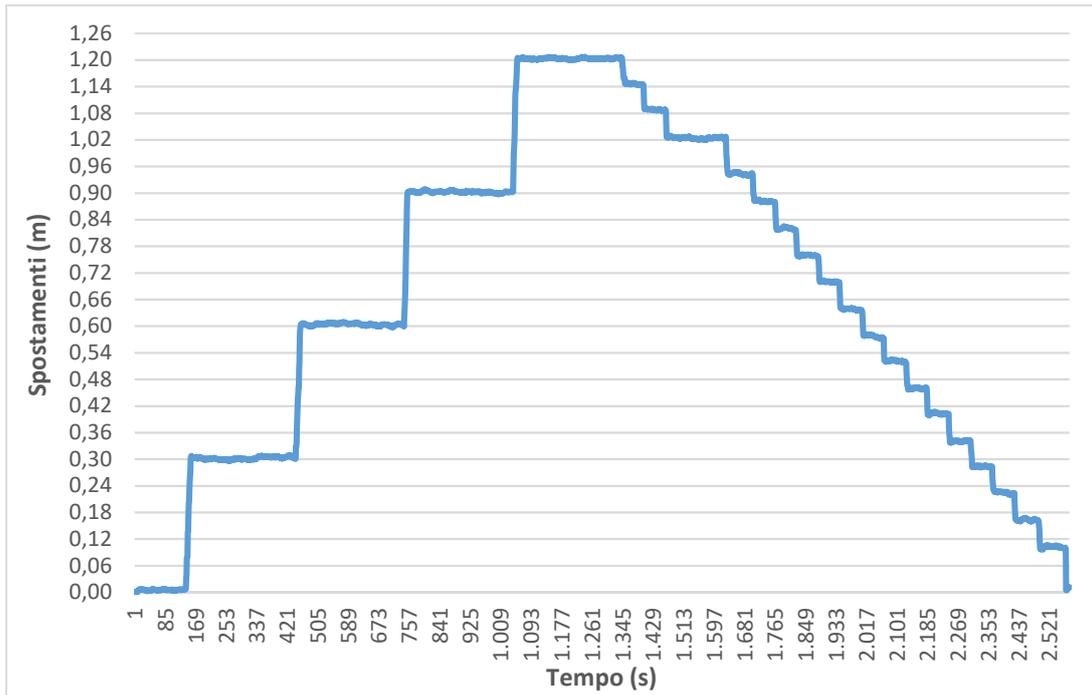


Figura 116 – Spostamenti per prova con antenna Garmin e ricevitore U-Blox, in planimetria

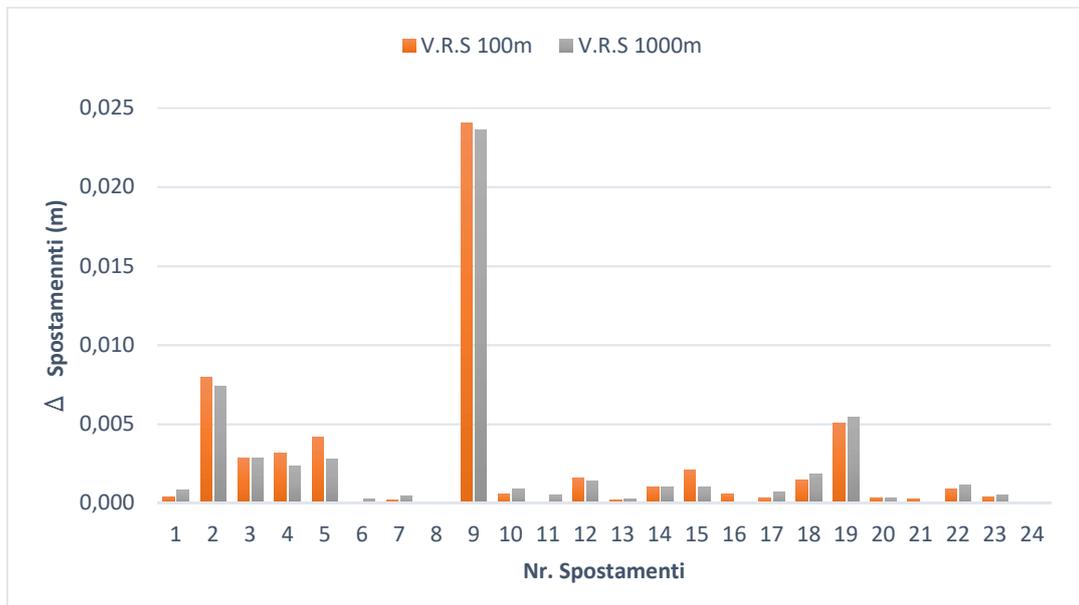


Figura 117 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna Garmin e ricevitore U-Blox - punto a, in planimetria

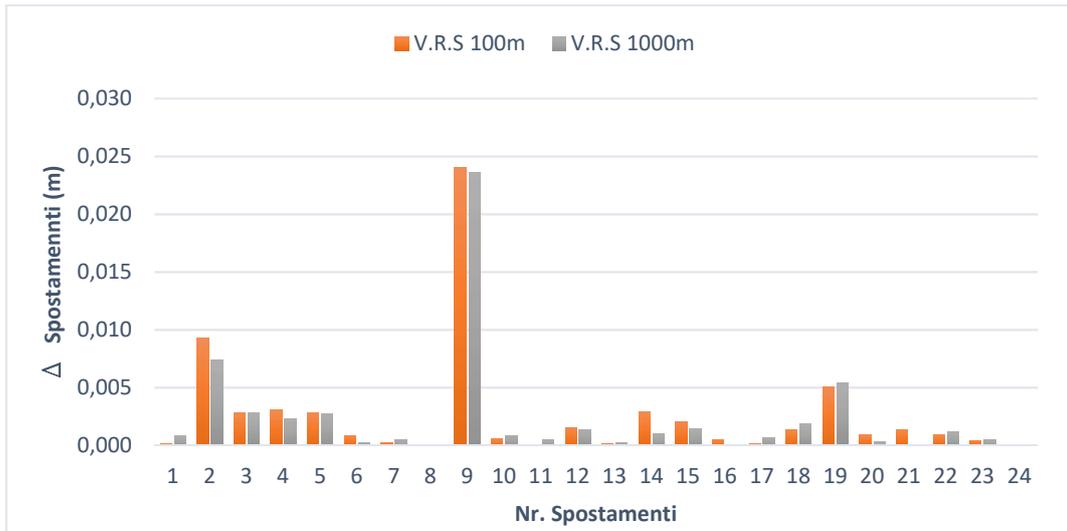


Figura 118 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna Garmin e ricevitore U-Blox - punto b, in planimetria

La Figura 119 mette in evidenza che anche per gli spostamenti effettuati con antenna patch e ricevitore U-Blox, il software è stato in grado di individuare tutti gli spostamenti.

Dalla Figura 120 e dalla Figura 121, dove sono rappresentati i risultati per gli spostamenti effettuati con ricevitore U-Blox e antenna Patch, si nota il fatto che c'è una buona uniformità del dato fra i due punti e fra le due V.R.S. e le differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli trovati con l'ausilio del programma RTK lib e le differenze minori sono ottenute con V.R.S posta a 1.000m.

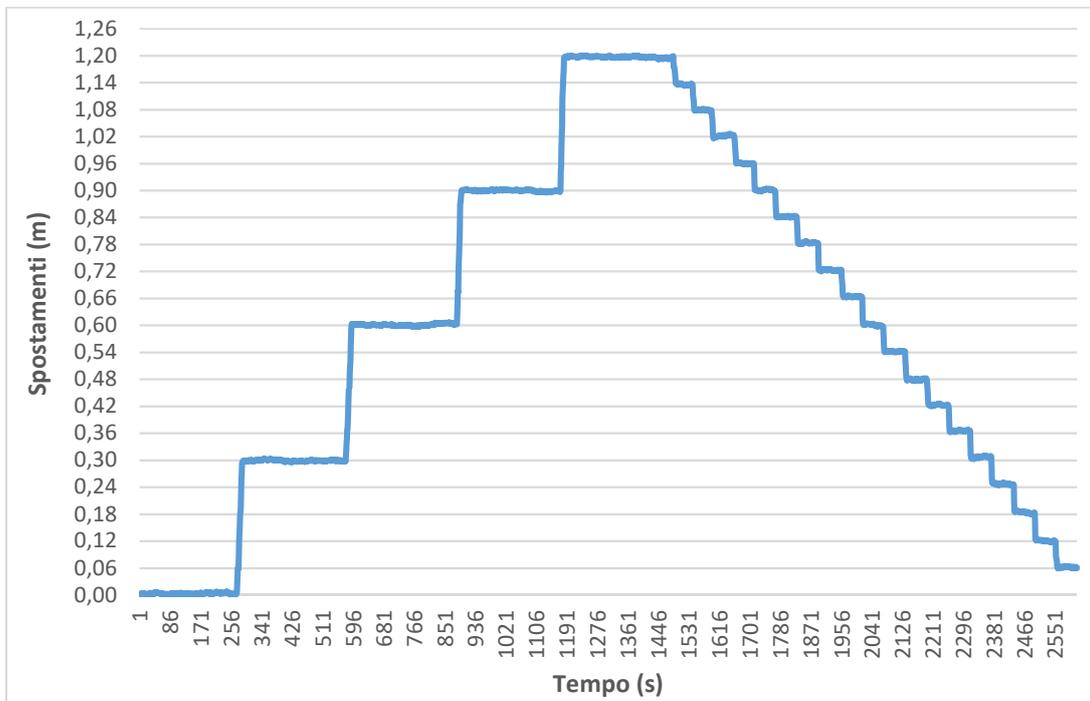


Figura 119 – Spostamenti per prova con antenna patch e ricevitore U-Blox, in planimetria

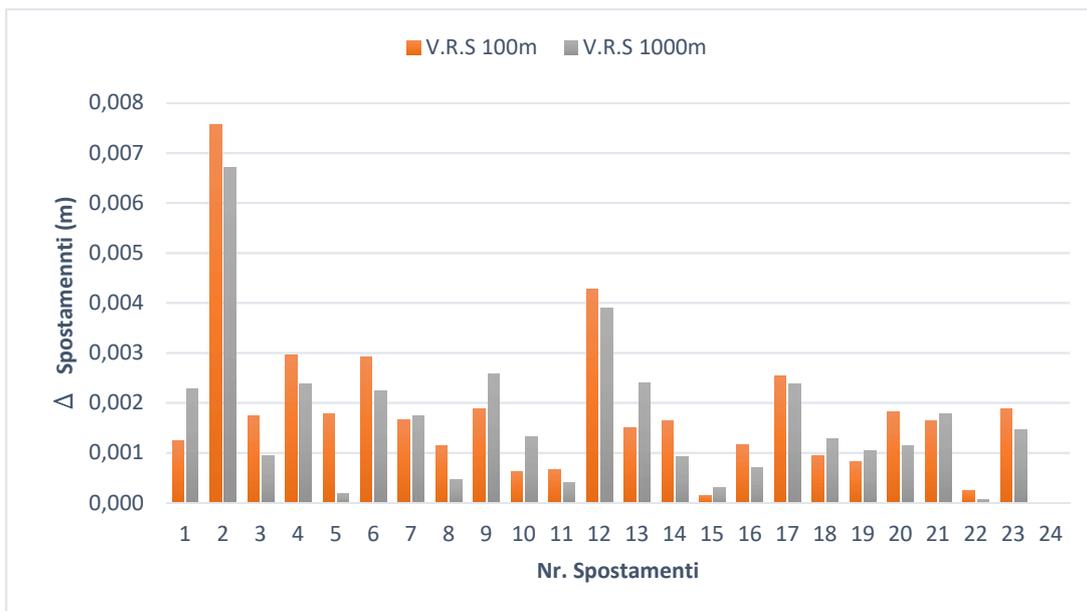


Figura 120 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna Patch e ricevitore U-Blox - punto a

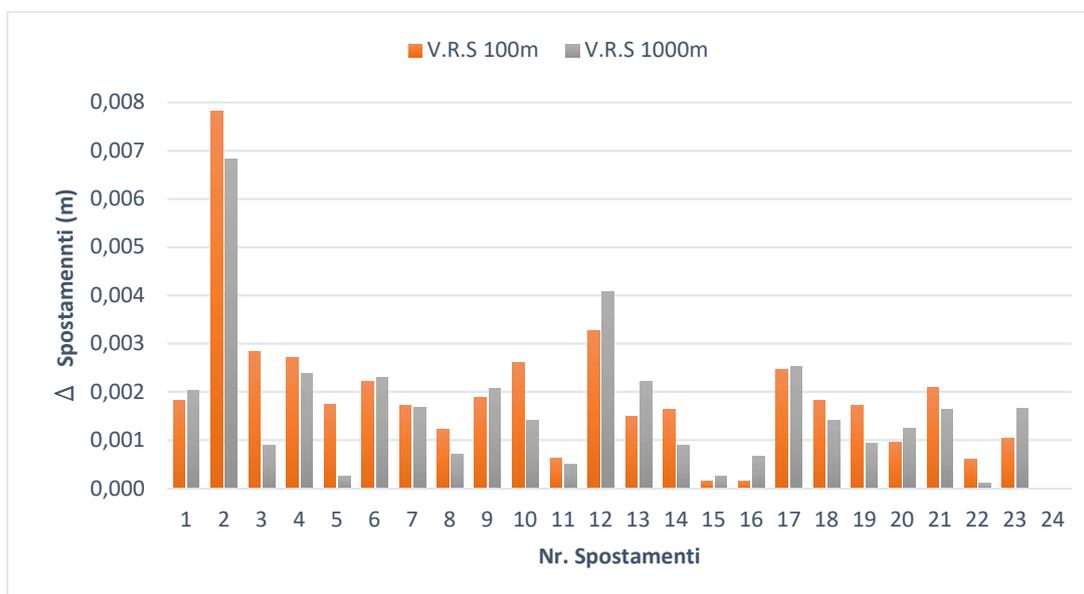


Figura 121 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna Patch e ricevitore U-Blox - punto b

Prova	Tipo di antenna e di ricevitore	Differenze minime (m)			
		Punto a		Punto b	
		V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m	V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m
Spostamenti appartenenti a "Rapid", come classe di velocità	Antenna e ricevitore Leica	0,000	0,000	0,000	0,000
	Antenna Leica e ricevitore U-blox	0,000	0,000	0,000	0,000
	Antenna Garmin e ricevitore U-blox	0,000	0,000	0,000	0,000
	Antenna Patch e ricevitore U-blox	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabella 40 – Differenze minime fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati per gli spostamenti appartenenti alla categoria "rapid" come classe di velocità secondo Varnes

Prova	Tipo di antenna e di ricevitore	Differenze massime(m)			
		Punto a		Punto b	
		V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m	V.R.S.100m	V.R.S. 1000m
Spostamenti appartenenti a "Rapid", come classe di velocità	Antenna e ricevitore Leica	0,003	0,004	0,005	0,005
	Antenna Leica e ricevitore U-blox	0,004	0,009	0,005	0,009
	Antenna Garmin e ricevitore U-blox	0,024	0,024	0,024	0,024
	Antenna Patch e ricevitore U-blox	0,008	0,007	0,008	0,007

Tabella 41 – Differenze massime fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati per gli spostamenti appartenenti alla categoria "rapid" come classe di velocità secondo Varnes, in planimetria

Prova	Tipo di antenna e di ricevitore	Differenze medie (m)			
		Punto a		Punto b	
		V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m	V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m
Spostamenti appartenenti a "Rapid", come classe di velocità	Antenna e ricevitore Leica	0,001	0,001	0,001	0,001
	Antenna Leica e ricevitore U-blox	0,002	0,002	0,002	0,002
	Antenna Garmin e ricevitore U-blox	0,003	0,003	0,003	0,003
	Antenna Patch e ricevitore U-blox	0,002	0,002	0,002	0,002

Tabella 42 – Differenze medie fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati per gli spostamenti appartenenti alla categoria "rapid" come classe di velocità secondo Varnes, in planimetria

Dalla Tabella 40, Tabella 41 e Tabella 42 dove sono presentate le differenze fra gli spostamenti trovati in seguito al trattamento del dato con RTK lib e gli spostamenti realmente effettuati si osserva il fatto che non ci sono grosse differenze fra le due V.R.S e fra le due baseline, rispettivamente punto a e punto b. Le differenze minore sono ottenute con antenna e ricevitore Leica.

Prova	Tipo di ricevitore	Scarti quadratici medi (m)			
		Punto a		Punto b	
		V.R.S. 100m	V.R.S. 1.000m	V.R.S. 100m	V.R.S. 1.000m
Spostamenti appartenenti a "Rapid", come classe di velocità	Antenna e ricevitore Leica	0,001	0,003	0,001	0,002
	Antenna Leica e ricevitore U-blox	0,000	0,002	0,002	0,002
	Antenna Garmin e ricevitore U-blox	0,009	0,009	0,009	0,009
	Antenna Patch e ricevitore U-blox	0,000	0,001	0,000	0,000

Tabella 43 – Scarti quadratici medi per gli spostamenti appartenenti alla categoria "rapid" come classe di velocità secondo Varnes, in planimetria

- Spostamenti in altimetria

Nella Figura 122 sono presenti gli spostamenti effettuati con antenna e ricevitore Leica, si nota il fatto che il segnale è abbastanza rumoroso, però tutti gli spostamenti sono stati individuati.

Dalla Figura 123, dove sono rappresentate le differenze fra gli spostamenti rilevati e quelli effettuati, si può osservare l'uniformità del dato per le due V.R.S e le due baseline, rispettivamente punto a e punto b.

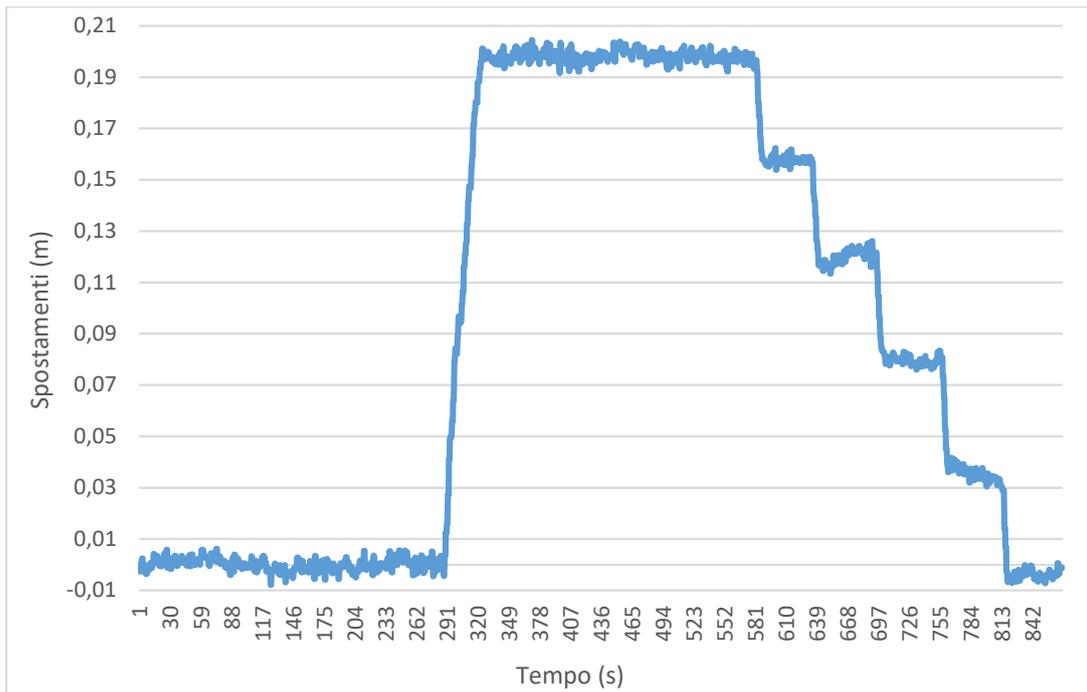


Figura 122 – Spostamenti per prova con antenna e ricevitore Leica

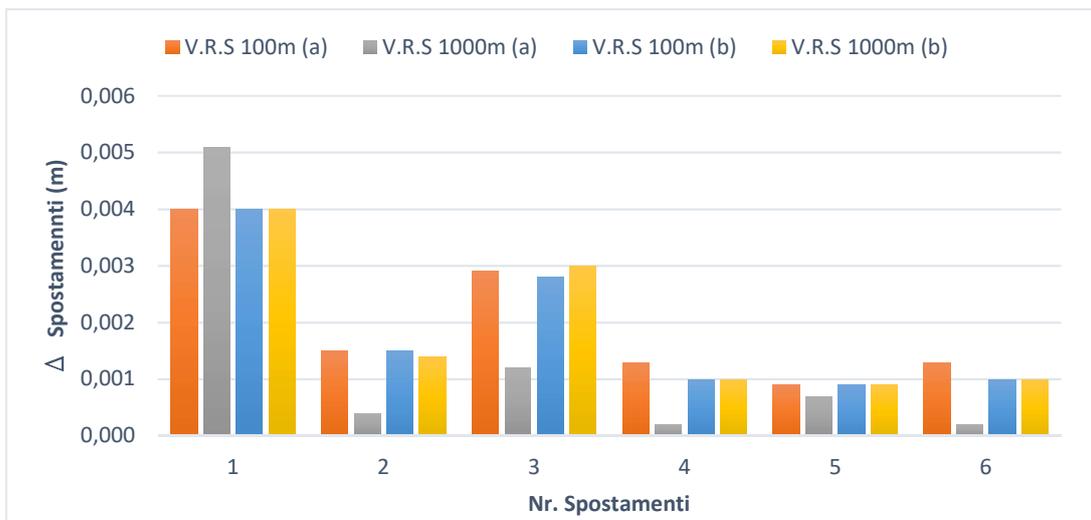


Figura 123 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna e ricevitore Leica

Nella Figura 124 dove sono rappresentati gli spostamenti si nota che il dato risulta essere rumoroso, tutti gli spostamenti sono stati trovati e, per il periodo compreso fra il secondo 705 e il secondo 750, la qualità è maggiore di 1, per questo motivo il dato non può essere considerato attendibile e di conseguenza nel calcolo dello spostamento va eliminato. Dalla Figura 125, dove sono presente le differenze fra gli spostamenti rilevati e quelli effettuati, si nota il fatto che il dato migliore, ovvero le differenze minore sono ottenute con V.R.S posta a 100m e per la baseline del punto a.

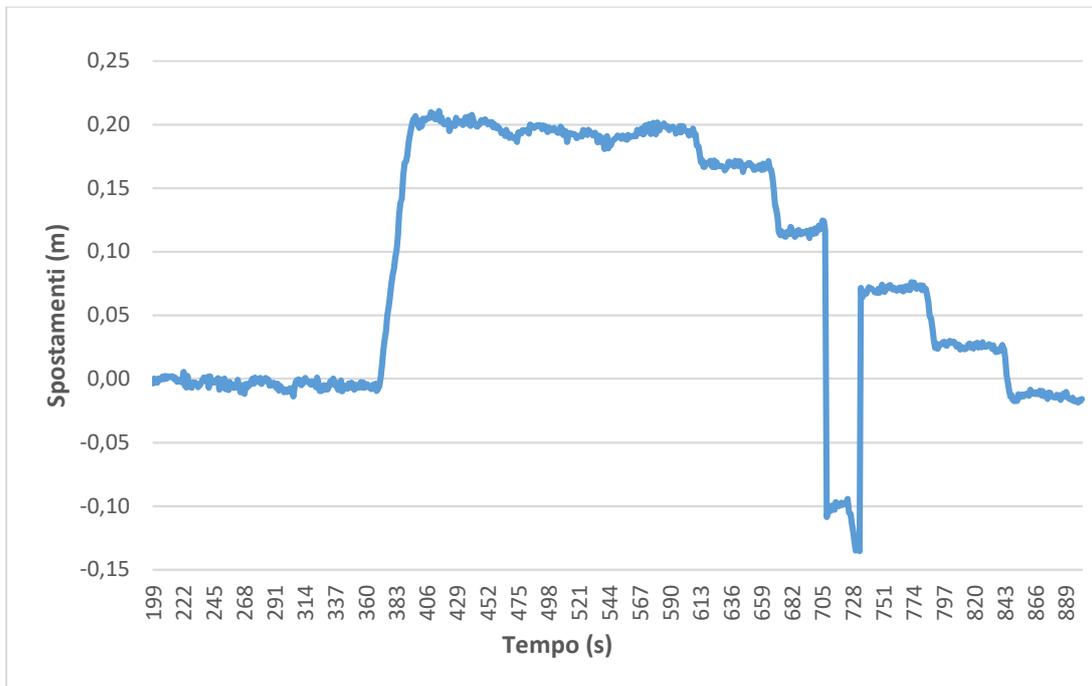


Figura 124 – Spostamenti per prova con antenna Leica e ricevitore U-blox

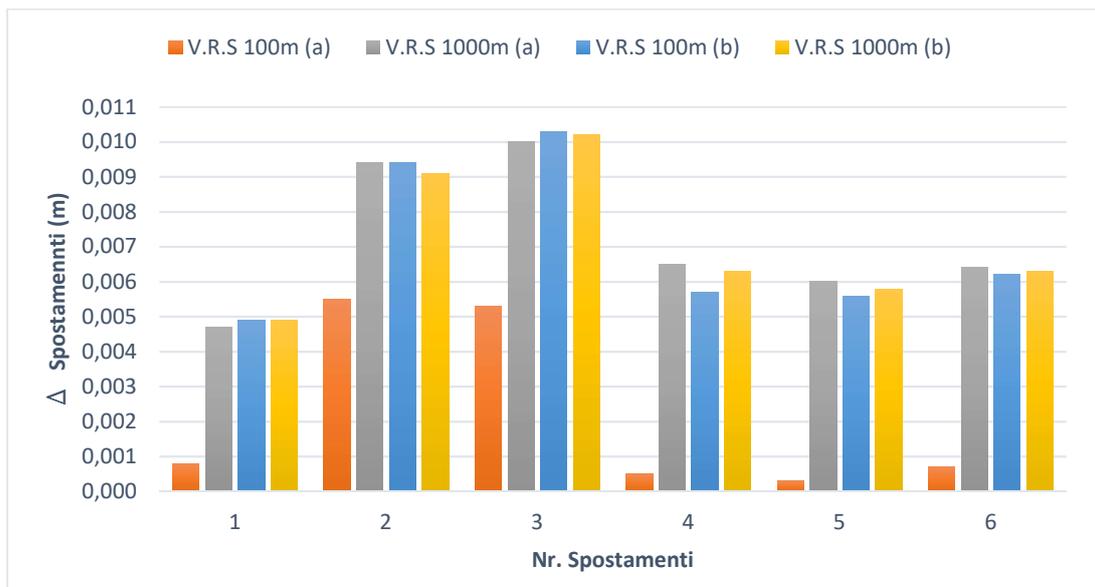


Figura 125 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna Leica e ricevitore U-Blox

Nella Figura 126, dove sono rappresentati gli spostamenti trovati, si nota la rumorosità del segnale ricevuto. Per gli spostamenti con antenna Garmin e ricevitore U-Blox, tutti gli spostamenti sono stati individuati.

Dalla Figura 127, dove sono presenti le differenze fra gli spostamenti rilevati e quelli effettuati, si nota il fatto che il dato migliore si è ottenuto con V.R.S posta a 100m.

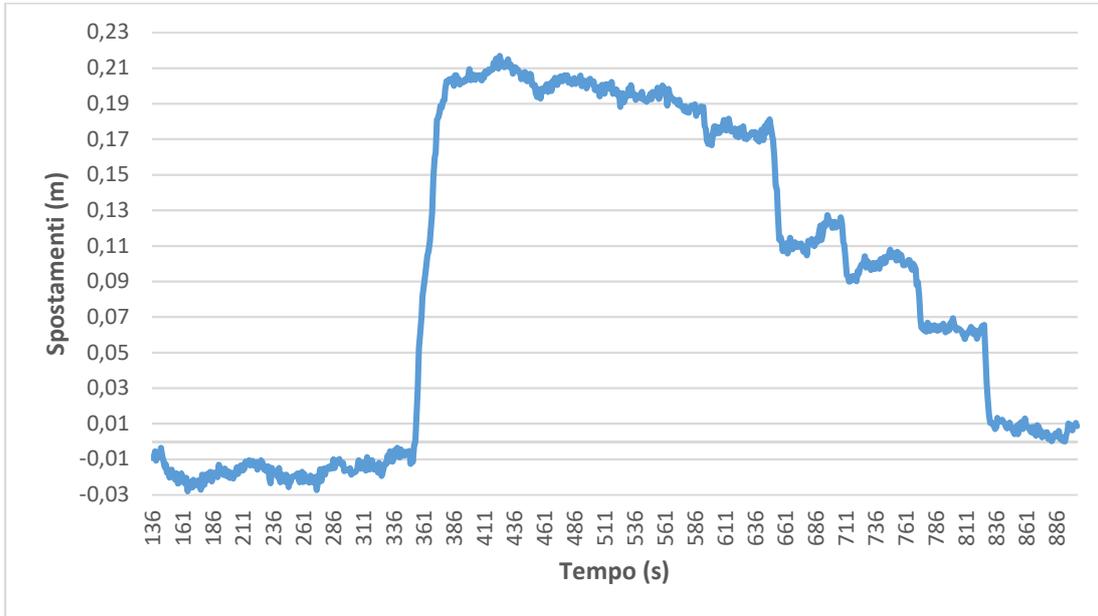


Figura 126 – Spostamenti per prova con antenna Garmin e ricevitore U-blox

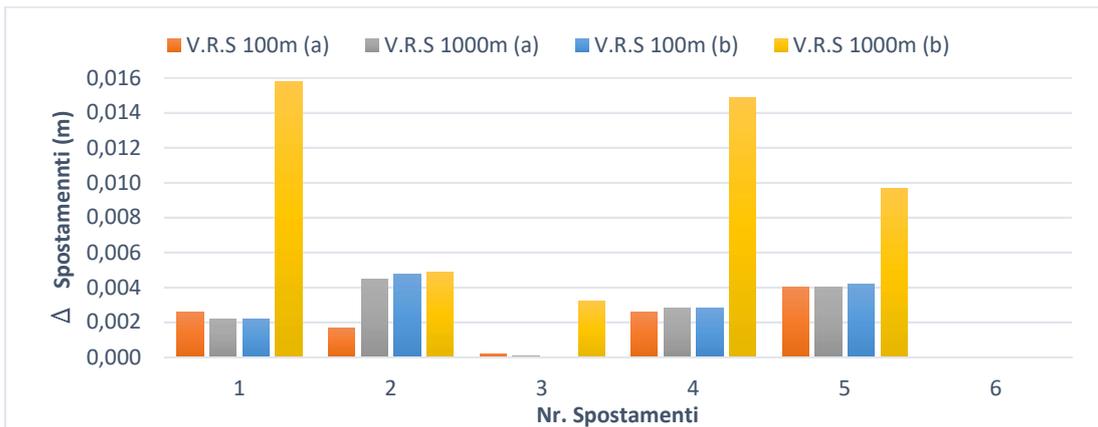


Figura 127 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna Garmin e ricevitore U-Blox

Dalla Figura 128 si nota la rumorosità del segnale e il fatto che tutti gli spostamenti effettuati sono stati individuati. Il periodo compreso fra il secondo 110 e il secondo 150 è stato eliminato in quanto la qualità del dato generato dal software RTK lib risulta essere superiore ad uno.

Nella Figura 129 sono rappresentate le differenze fra gli spostamenti rilevati e quelli effettuati, dove si osserva il fatto che c'è uniformità fra le due V.R.S e le due baseline, rispettivamente punto a e punto b.

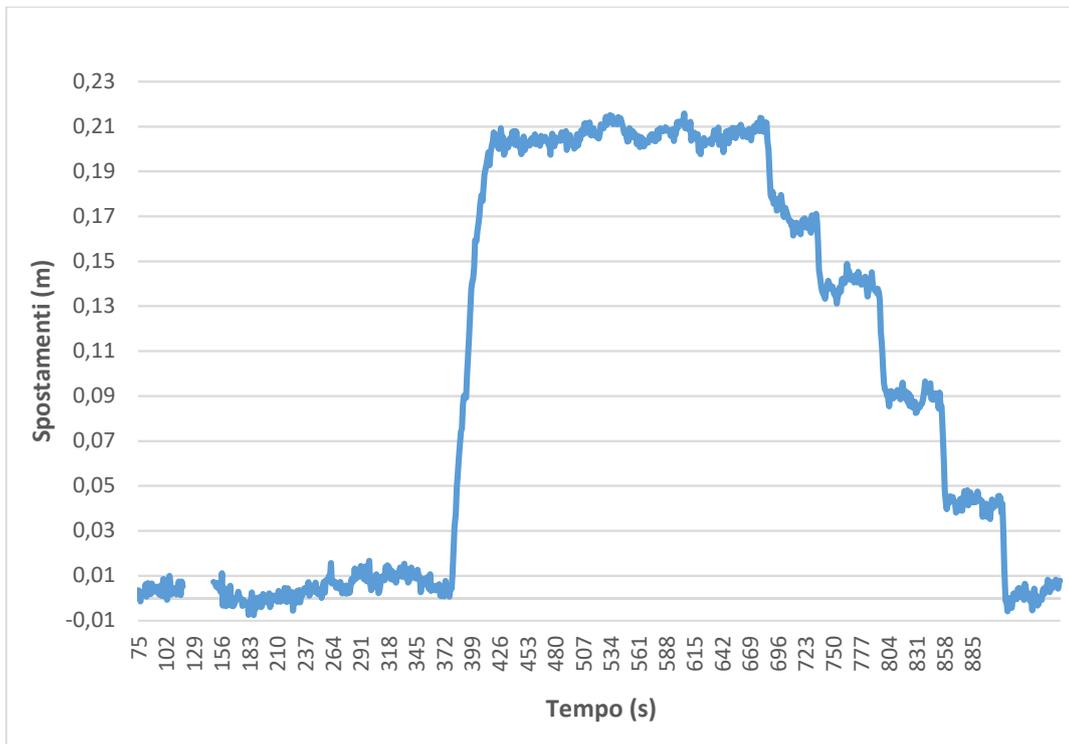


Figura 128 – Spostamenti per prova con antenna patch e ricevitore U-blox

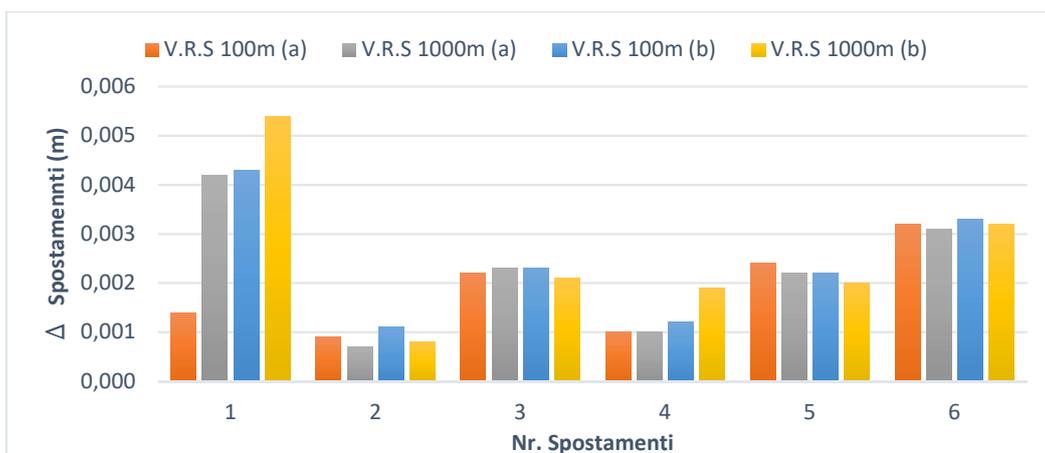


Figura 129 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna Patch e ricevitore U-Blox

Prova	Tipo di antenna e di ricevitore	Differenze minime (m)			
		Punto a		Punto b	
		V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m	V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m
Spostamenti appartenenti a "Rapid", come classe di velocità	Antenna e ricevitore Leica	0,001	0,001	0,000	0,001
	Antenna Leica e ricevitore U-blox	0,000	0,005	0,005	0,005
	Antenna Garmin e ricevitore U-blox	0,000	0,000	0,000	0,003
	Antenna Patch e ricevitore U-blox	0,001	0,001	0,001	0,001

Tabella 44 – Differenze minime fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati per gli spostamenti appartenenti alla categoria "rapid" come classe di velocità secondo Varnes

Prova	Tipo di antenna e di ricevitore	Differenze massime(m)			
		Punto a		Punto b	
		V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m	V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m
Spostamenti appartenenti a "Rapid", come classe di velocità	Antenna e ricevitore Leica	0,004	0,005	0,004	0,004
	Antenna Leica e ricevitore U-blox	0,006	0,010	0,010	0,010
	Antenna Garmin e ricevitore U-blox	0,004	0,004	0,005	0,016
	Antenna Patch e ricevitore U-blox	0,003	0,004	0,004	0,005

Tabella 45 – Differenze massime fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati per gli spostamenti appartenenti alla categoria "rapid" come classe di velocità secondo Varnes

Prova	Tipo di antenna e di ricevitore	Differenze medie (m)			
		Punto a		Punto b	
		V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m	V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m
Spostamenti appartenenti a "Rapid", come classe di velocità	Antenna e ricevitore Leica	0,002	0,001	0,002	0,002
	Antenna Leica e ricevitore U-blox	0,002	0,007	0,007	0,007
	Antenna Garmin e ricevitore U-blox	0,002	0,003	0,003	0,010
	Antenna Patch e ricevitore U-blox	0,002	0,002	0,002	0,003

Tabella 46 – Differenze medie fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati per gli spostamenti appartenenti alla categoria "rapid" come classe di velocità secondo Varnes

Nella Tabella 44, Tabella 45 e Tabella 46 sono presentate le differenze minime, massime e medie fra gli spostamenti rilevati e quelli effettuati, dove si nota il fatto che il dato migliore si è ottenuto con V.R.S posta a 100m.

Prova	Tipo di ricevitore	Scarti quadratici medi (m)			
		Punto a		Punto b	
		V.R.S. 100m	V.R.S. 1.000m	V.R.S. 100m	V.R.S. 1.000m
Spostamenti appartenenti alla categoria "rapid", come classe di velocità	Antenna e ricevitore Leica	0,003	0,003	0,003	0,003
	Antenna Leica e ricevitore U-blox	0,001	0,006	0,000	0,005
	Antenna Garmin e ricevitore U-blox	0,001	0,000	0,000	0,006
	Antenna Patch e ricevitore U-blox	0,001	0,000	0,000	0,000

Tabella 47 – Scarti quadratici medi per gli spostamenti appartenenti alla categoria "rapid" come classe di velocità secondo Varnes, in altimetria

### 6.3.2 Spostamenti appartenenti tra la categoria “rapid” e “moderate” come classe di velocità, secondo Varnes – prova 2

- Spostamenti in planimetria

Nella Figura 130, dove sono rappresentati gli spostamenti rilevati in seguito al trattamento del dato con l’ausilio del software RTK lib, si nota il fatto che tutti gli spostamenti sono stati individuati. Il grafico rappresenta l’intero periodo di acquisizione dati. Questo periodo presenta dei picchi e dei valori particolari. Dal file dei risultati con RTK Lib sono tanti periodi anche di 20 secondi dove il dato processato risulta di una qualità superiore a 1 arrivando fino ad una qualità di 5. La qualità influisce sulle differenze fra gli spostamenti rilevati e quelli effettuati che sono presentate nella Figura 131 e nella Figura 132. Dove la qualità del dato è superiore a 1 il dato va eliminato, in quanto non può essere considerato attendibile, ovvero gli ultimi 12 spostamenti. In questi periodi dove il dato presenta una qualità maggiore di 1 si osserva che anche il test ratio, ovvero i valori lontani dalla media, arriva fino a 12. Il numero dei satelliti rimane abbastanza costante per l’intero periodo di prova, varia da un minimo di 11 ad un massimo di 15 appartenenti alle due costellazioni GPS e GLONASS.

Dalla Figura 131 e dalla Figura 132 si nota il fatto che il dato migliore, ovvero le differenze minori, si è ottenuto con V.R.S posta a 100m.

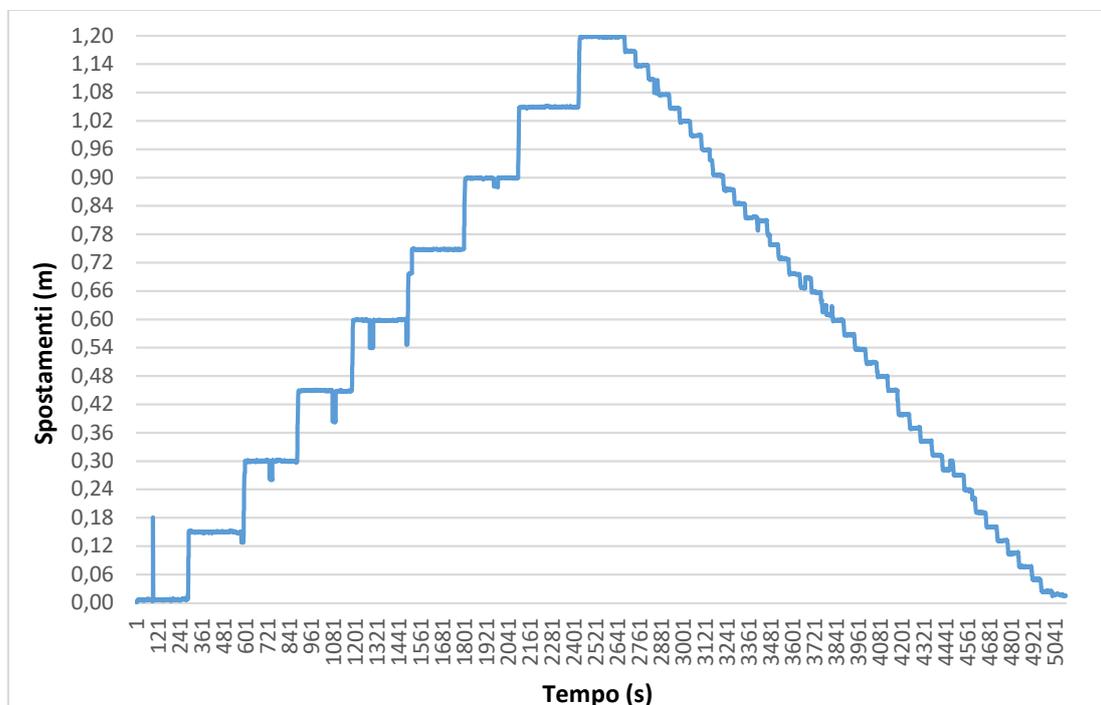


Figura 130 – Spostamenti per la prova con antenna e ricevitore Leica

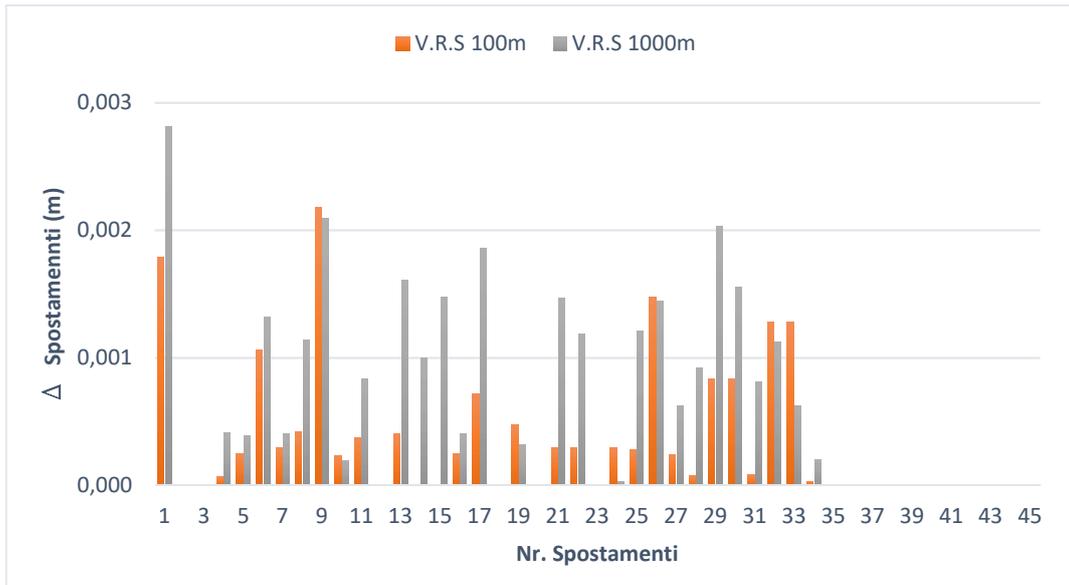


Figura 131 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna e ricevitore Leica - punto a

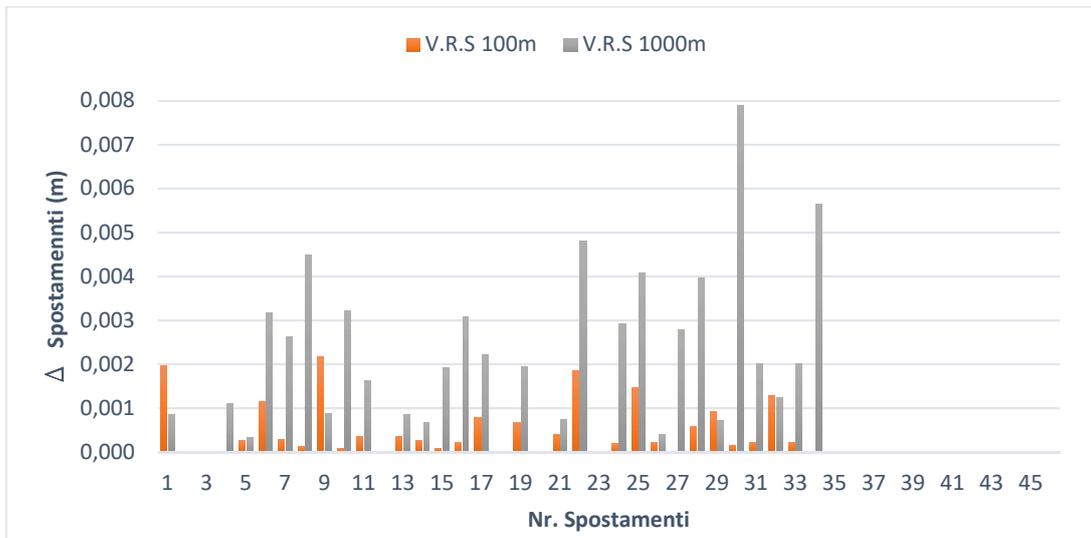


Figura 132 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna e ricevitore Leica - punto b

Nella Figura 133 sono rappresentati gli spostamenti eseguiti con antenna Leica e ricevitore U-Blox e rilevati con il software RTK lib, dove si nota il fatto che tutti gli spostamenti sono stati individuati.

Per gli spostamenti effettuati con antenna Leica e ricevitore U-Blox, dalla Figura 134 e dalla Figura 135 si nota il fatto che i dati sono molto simili, sia per le due baseline che per le due V.R.S.

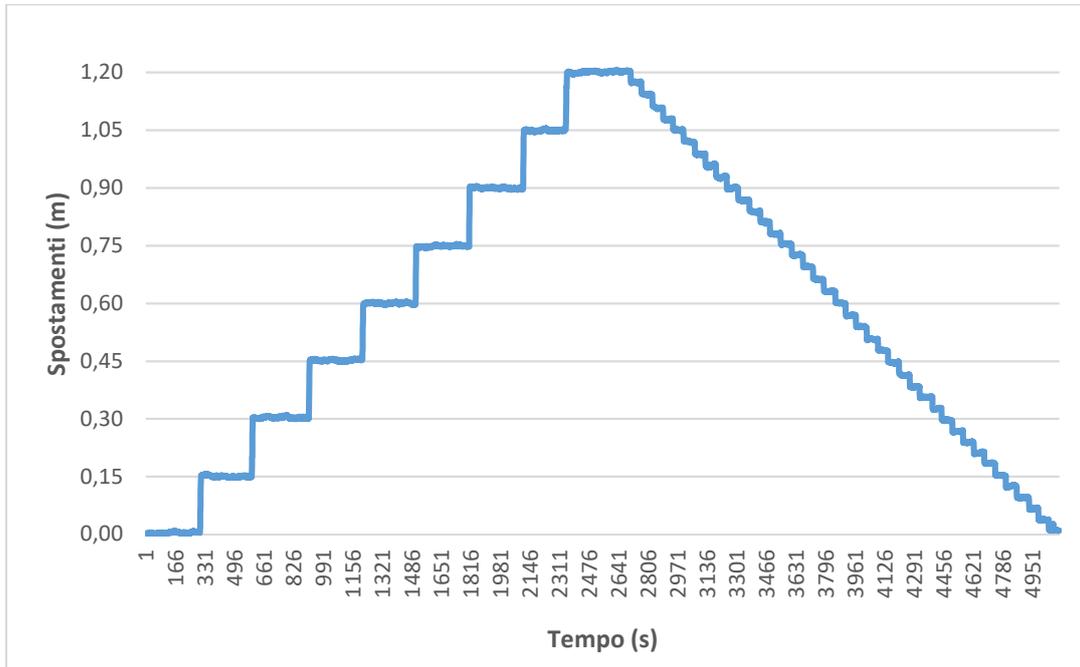


Figura 133 – Spostamenti per la prova con antenna Leica e ricevitore U-Blox

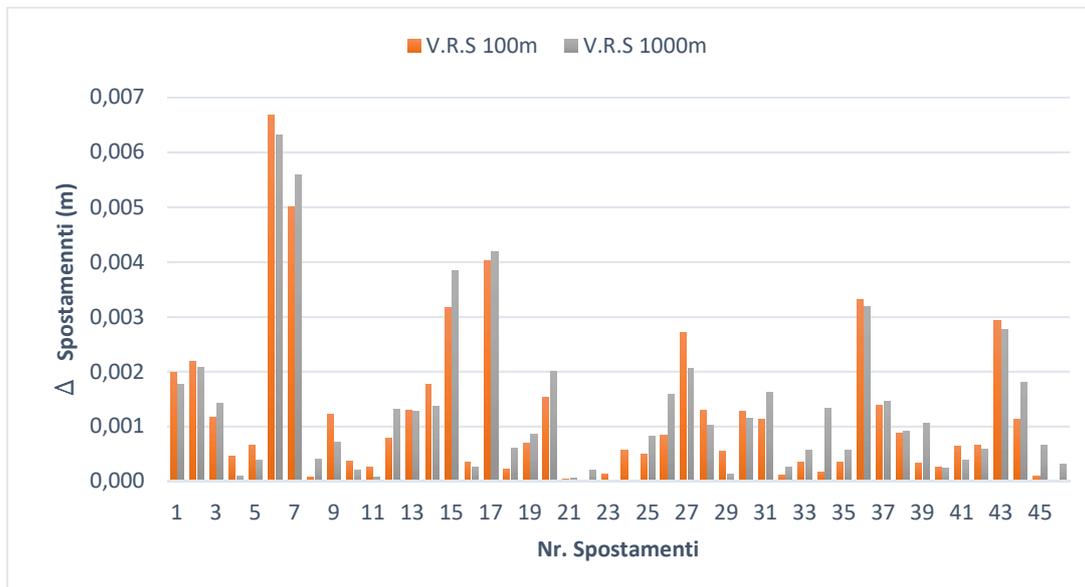


Figura 134 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna Leica e ricevitore U-Blox - punto a

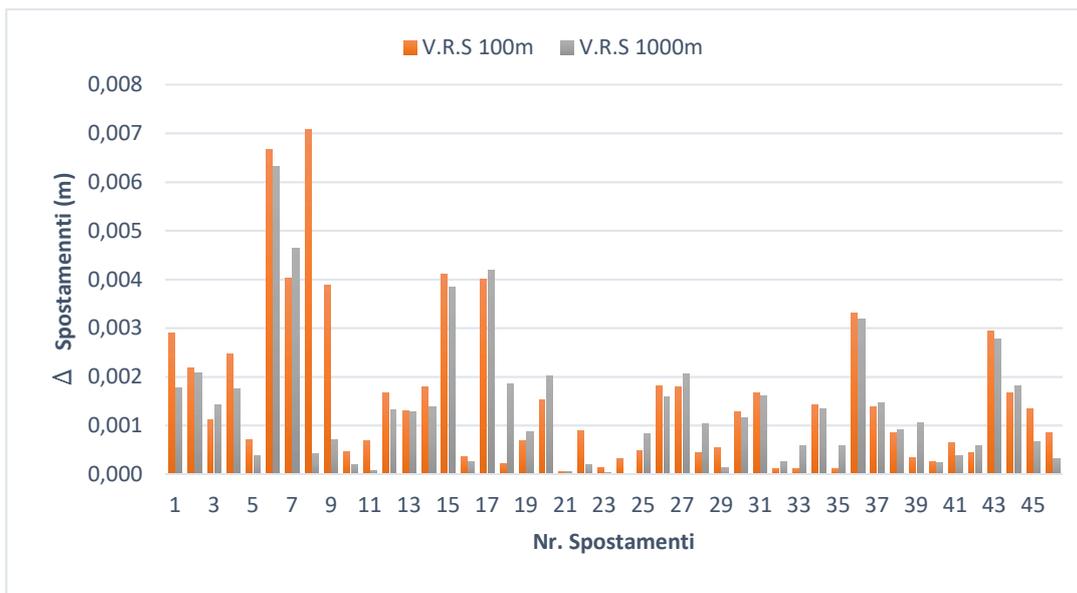


Figura 135 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna Leica e ricevitore U-Blox - punto b

Nella Figura 136 sono rappresentati gli spostamenti rilevati con RTK lib per i test eseguiti con antenna Garmin e il ricevitore U-Blox, dove si nota il fatto che tutti sono stati individuati. Nell'ultimo spostamento, il software ha generato come soluzione un dato con la qualità superiore a 1 e nel calcolo dello spostamento rilevato, questa porzione di dato va eliminata in quanto non può essere considerata attendibile.

Per gli spostamenti effettuati con antenna Garmin e ricevitore U-Blox, come si può notare dalla Figura 137 e dalla Figura 138, sono molto simili, sia per le due baselines che per le due V.R.S.

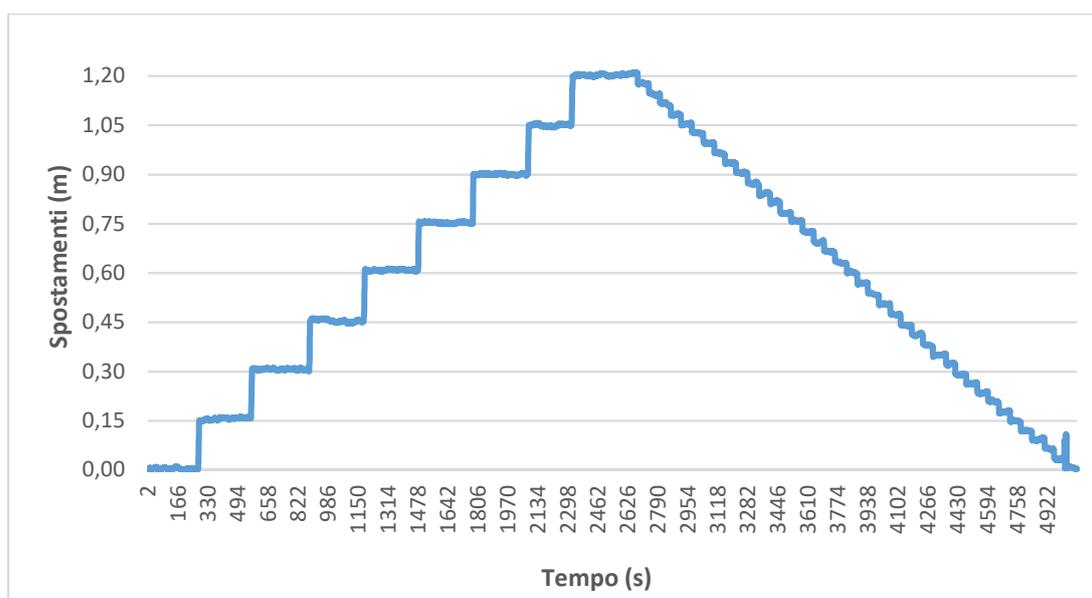


Figura 136 – Spostamenti per la prova con antenna Garmin e ricevitore U-Blox

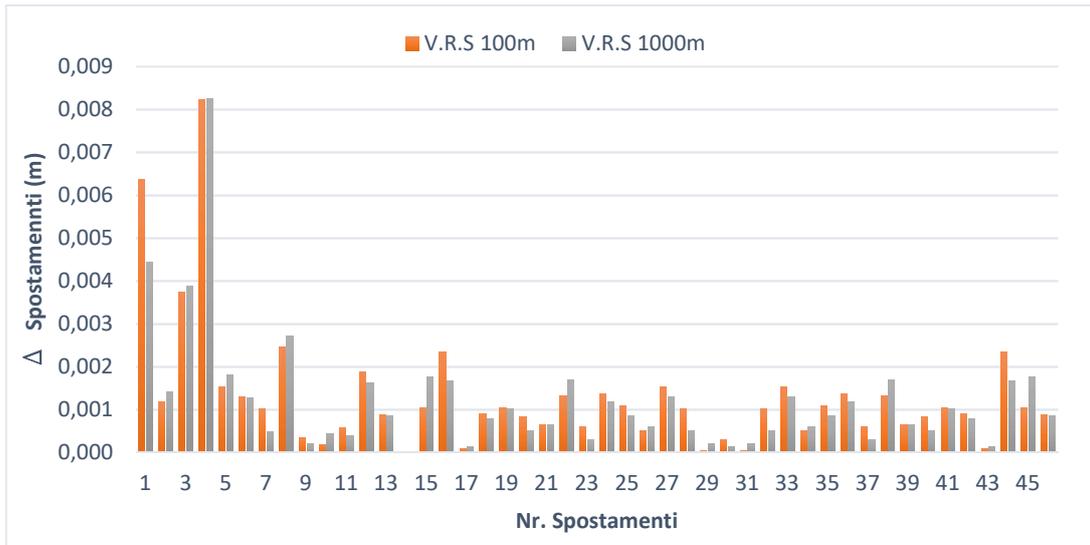


Figura 137 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna Garmin e ricevitore U-Blox - punto a

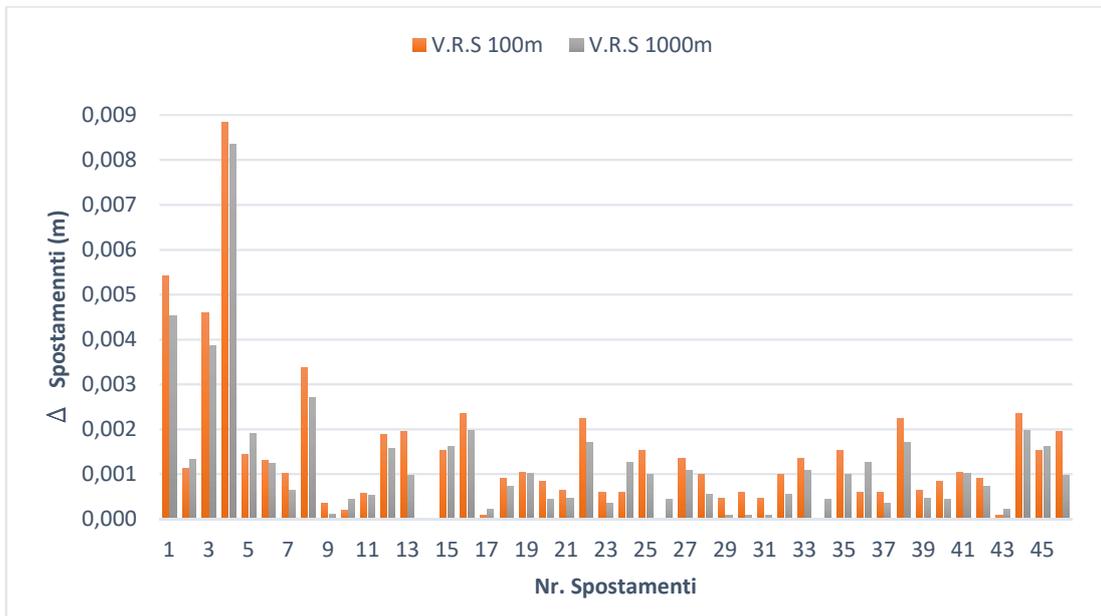


Figura 138 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna Garmin e ricevitore U-Blox - punto b

Nella Figura 139 sono presenti gli spostamenti per la prova con antenna patch e ricevitore U-Blox, dove si osserva il fatto che tutti sono stati individuati con una qualità buona del dato.

Per le differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna Patch e ricevitore U-Blox, come si può notare dalla Figura 140 e dalla Figura 141, i dati hanno l'uniformità sia per le due baselines che per le due V.R.S.

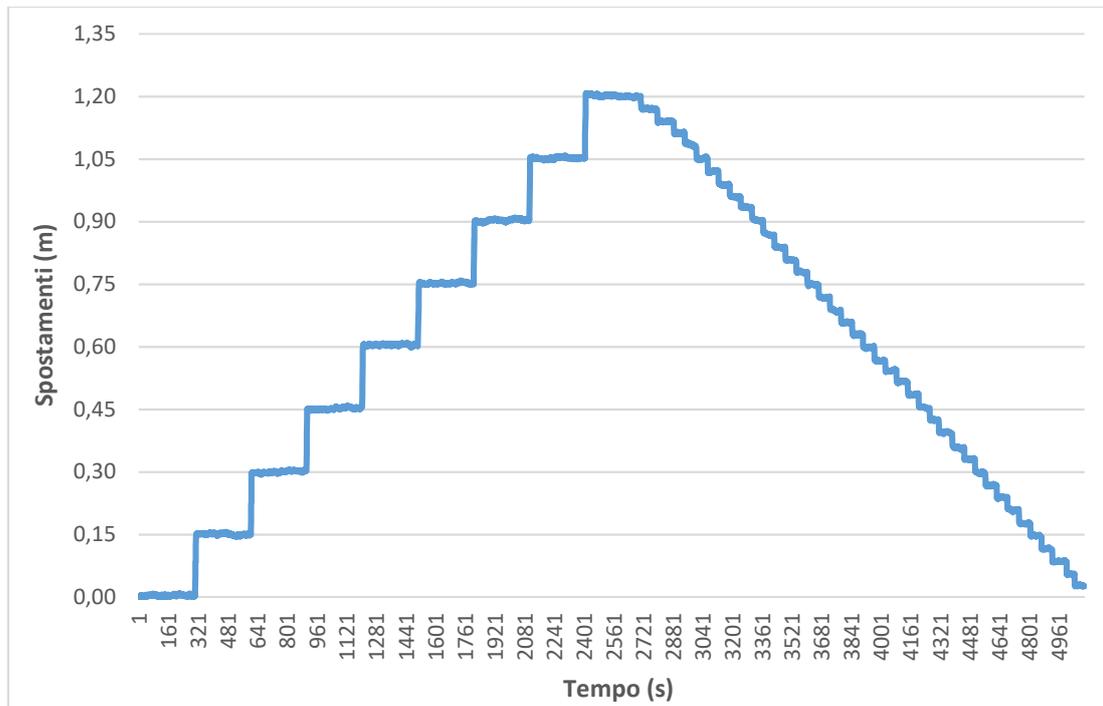


Figura 139 – Spostamenti per la prova con antenna patch e ricevitore U-Blox

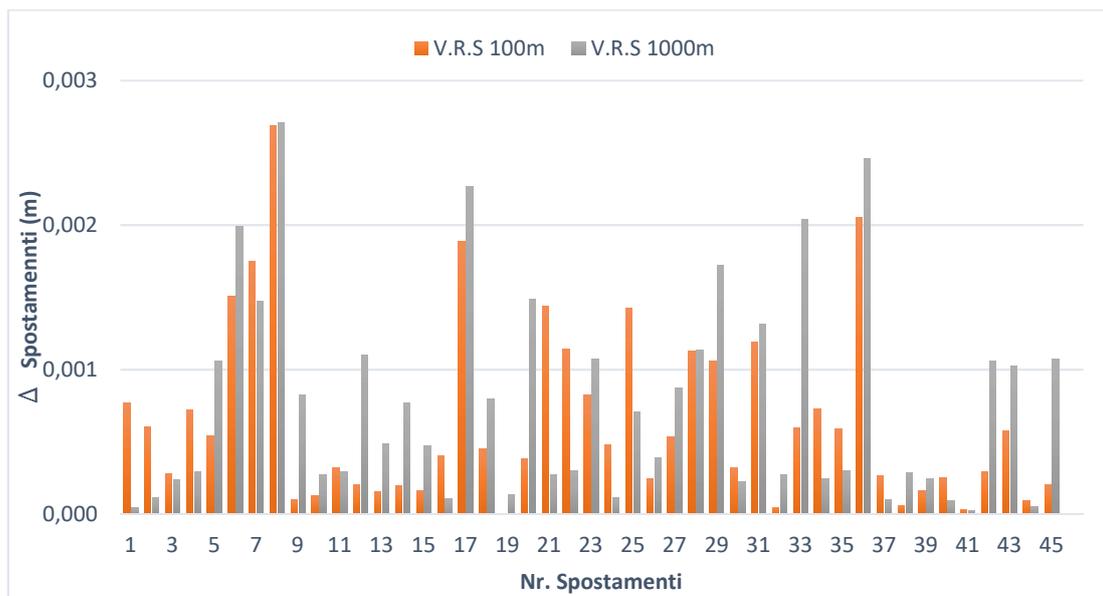


Figura 140 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna Patch e ricevitore U-Blox - punto a

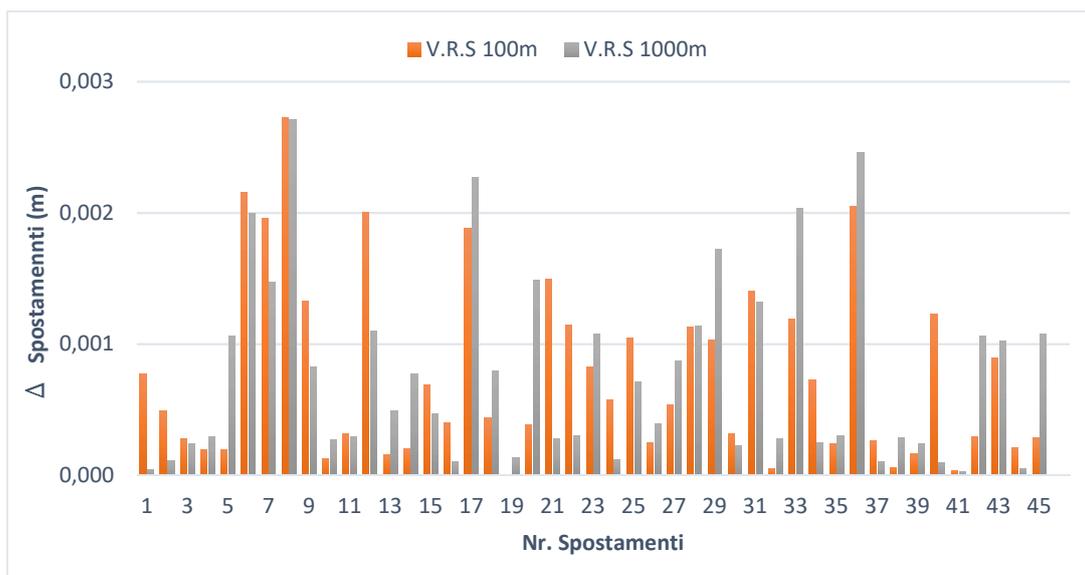


Figura 141 - Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna Patch e ricevitore U-Blox - punto b

Prova	Tipo di antenna e di ricevitore	Differenze minime (m)			
		Punto a		Punto b	
		V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m	V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m
Spostamenti appartenenti tra "rapid" e "moderate", come classe di velocità	Antenna e ricevitore Leica	0,000	0,000	0,000	0,000
	Antenna Leica e ricevitore U-blox	0,000	0,000	0,000	0,000
	Antenna Garmin e ricevitore U-blox	0,000	0,000	0,000	0,000
	Antenna Patch e ricevitore U-blox	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabella 48 – Differenze minime fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati per gli spostamenti appartenenti tra la categoria "rapid" e "moderate" come classe di velocità secondo Varnes

Prova	Tipo di antenna e di ricevitore	Differenze massime(m)			
		Punto a		Punto b	
		V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m	V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m
Spostamenti appartenenti tra "rapid" e "moderate", come classe di velocità	Antenna e ricevitore Leica	0,002	0,003	0,002	0,006
	Antenna Leica e ricevitore U-blox	0,007	0,006	0,007	0,006
	Antenna Garmin e ricevitore U-blox	0,008	0,008	0,009	0,008
	Antenna Patch e ricevitore U-blox	0,003	0,003	0,003	0,003

Tabella 49 – Differenze massime fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati per gli spostamenti appartenenti tra la categoria "rapid" e "moderate" come classe di velocità secondo Varnes

Prova	Tipo di antenna e di ricevitore	Differenze medie (m)			
		Punto a		Punto b	
		V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m	V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m
Spostamenti appartenenti tra "rapid" e "moderate", come classe di velocità	Antenna e ricevitore Leica	0,001	0,001	0,001	0,002
	Antenna Leica e ricevitore U-blox	0,001	0,001	0,002	0,001
	Antenna Garmin e ricevitore U-blox	0,001	0,001	0,001	0,001
	Antenna Patch e ricevitore U-blox	0,001	0,001	0,001	0,001

Tabella 50 – Differenze medie fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati per gli spostamenti appartenenti tra la categoria "rapid" e "moderate" come classe di velocità secondo Varnes

Nella Tabella 48, Tabella 49 e nella Tabella 50 sono presenti le differenze fra gli spostamenti rilevati e quelli effettuati, dove si nota il fatto che il dato è sensibilmente uguale per le due V.R.S e per le due baselines e sono tutti al di sotto del centimetro.

Prova	Tipo di ricevitore	Scarti quadratici medi (m)			
		Punto a		Punto b	
		V.R.S. 100m	V.R.S. 1.000m	V.R.S. 100m	V.R.S. 1.000m
Spostamenti appartenenti tra "rapid" e "moderate", come classe di velocità	Antenna e ricevitore Leica	0,001	0,003	0,000	0,007
	Antenna Leica e ricevitore U-blox	0,004	0,002	0,001	0,003
	Antenna Garmin e ricevitore U-blox	0,006	0,005	0,006	0,005
	Antenna Patch e ricevitore U-blox	0,000	0,001	0,001	0,001

Tabella 51 – Scarti quadratici medi per gli spostamenti tra la categoria "rapid" e "moderate" come classe di velocità secondo Varnes

- Spostamenti in altimetria

Nella Figura 142 sono rappresentati gli spostamenti rilevati per la prova con antenna e ricevitore Leica, dove si nota il fatto che sono stati tutti trovati, con un segnale abbastanza rumoroso, e nella Figura 143 dove sono rappresentate le differenze fra gli spostamenti rilevati e quelli effettuati, si nota l'uniformità fra le due V.R.S e fra le due baselines.

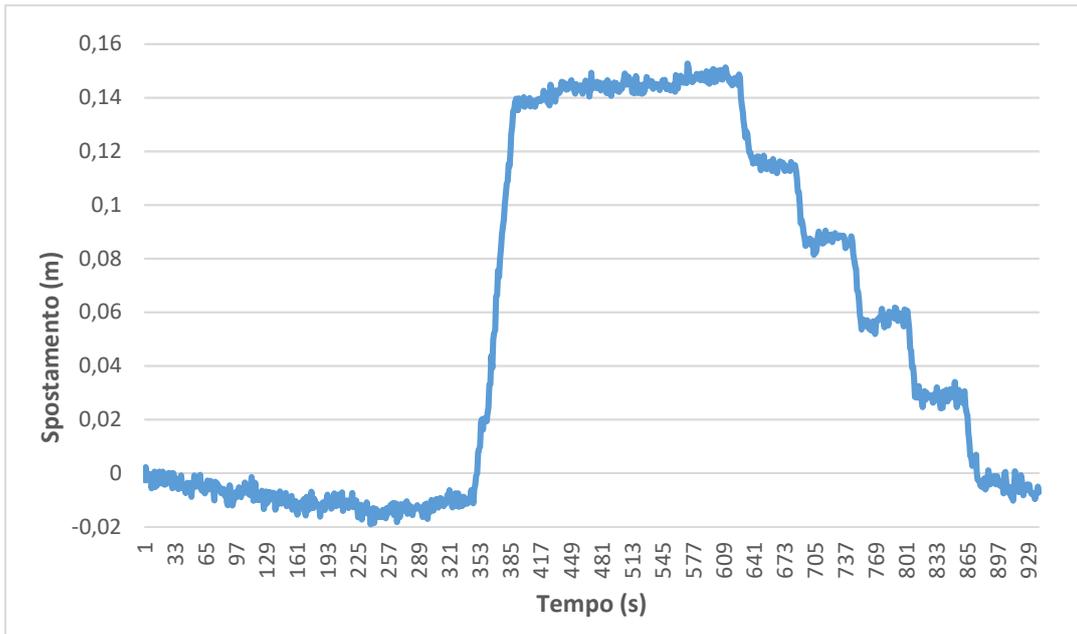


Figura 142 – Spostamenti per la prova con antenna e ricevitore Leica

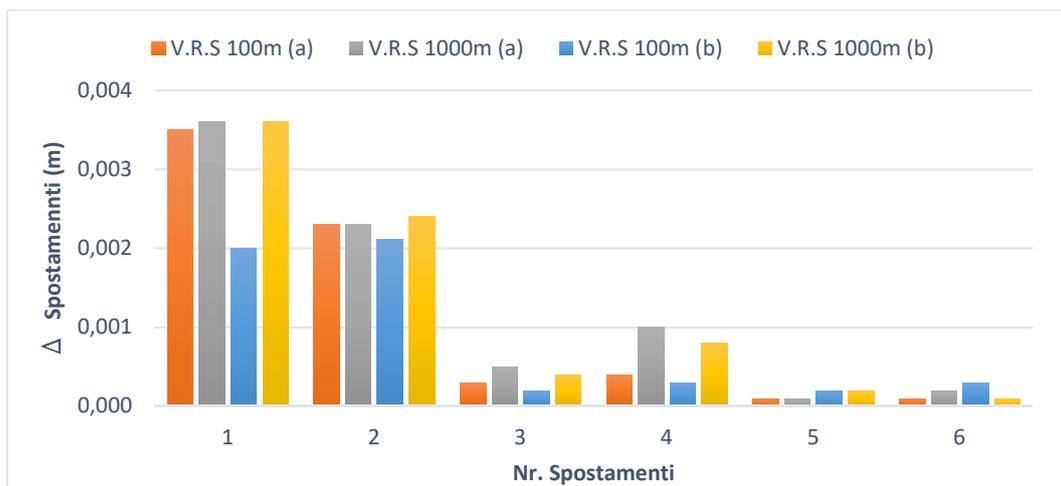


Figura 143 – Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna e ricevitore Leica

Nella Figura 144 sono presenti gli spostamenti rilevati in altimetria, per il test eseguito con antenna Leica e ricevitore U-Blox e si nota il fatto che tutti sono stati individuati dal software RTK lib, anche se il segnale ricevuto dai satelliti risulta essere molto rumoroso.

Nella Figura 145 sono rappresentate le differenze fra gli spostamenti rilevati e quelli effettuati con antenna Leica e ricevitore U-Blox, dove si nota che il dato migliore, ovvero le differenze minori, si è ottenuto con V.R.S a 100m.

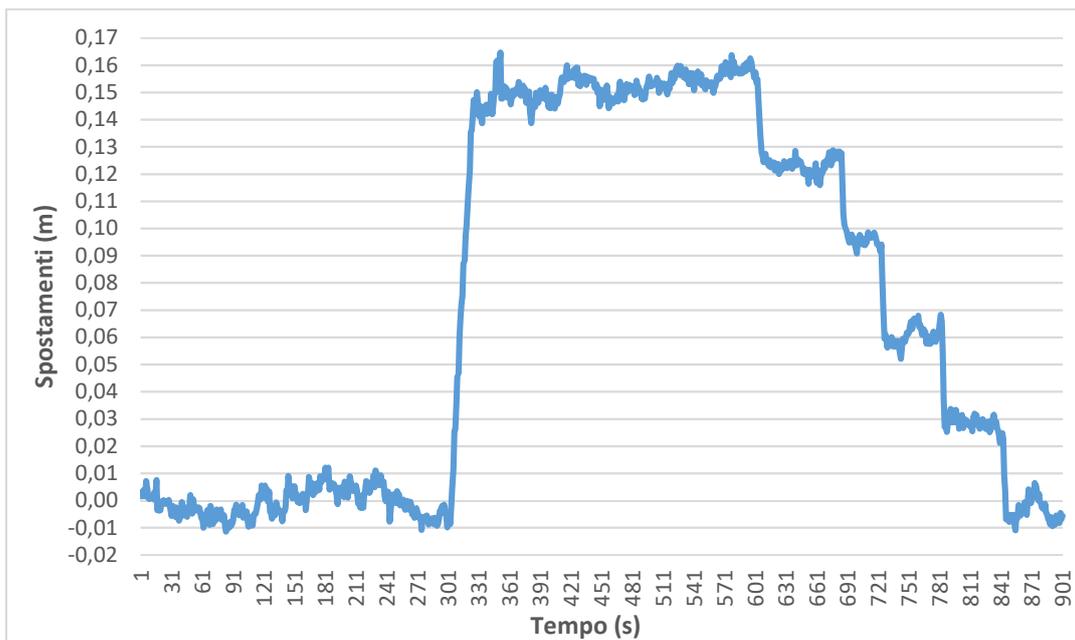


Figura 144 – Spostamenti per la prova con antenna Leica e ricevitore U-Blox

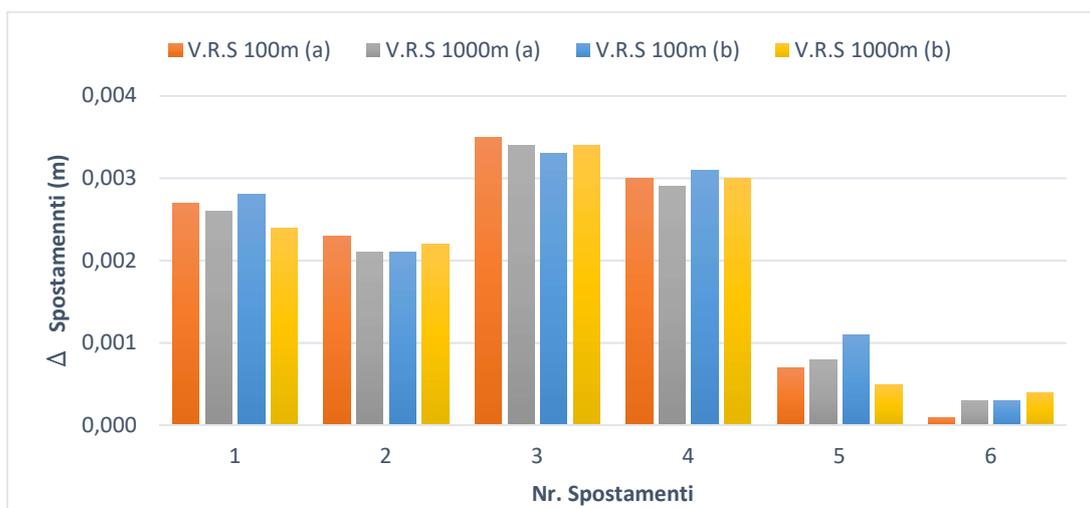


Figura 145 – Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna Leica e ricevitore U-Blox

Nella Figura 146 sono rappresentati gli spostamenti rilevati con antenna Garmin e ricevitore U-Blox, dove si nota il fatto che tutti sono stati individuati e il segnale ricevuto dai satelliti è molto rumoroso e nella Figura 147, dove sono rappresentate le differenze fra gli spostamenti rilevati e quelli effettuati, si nota il fatto che il dato migliore si è ottenuto con il V.R.S posta a 100m.

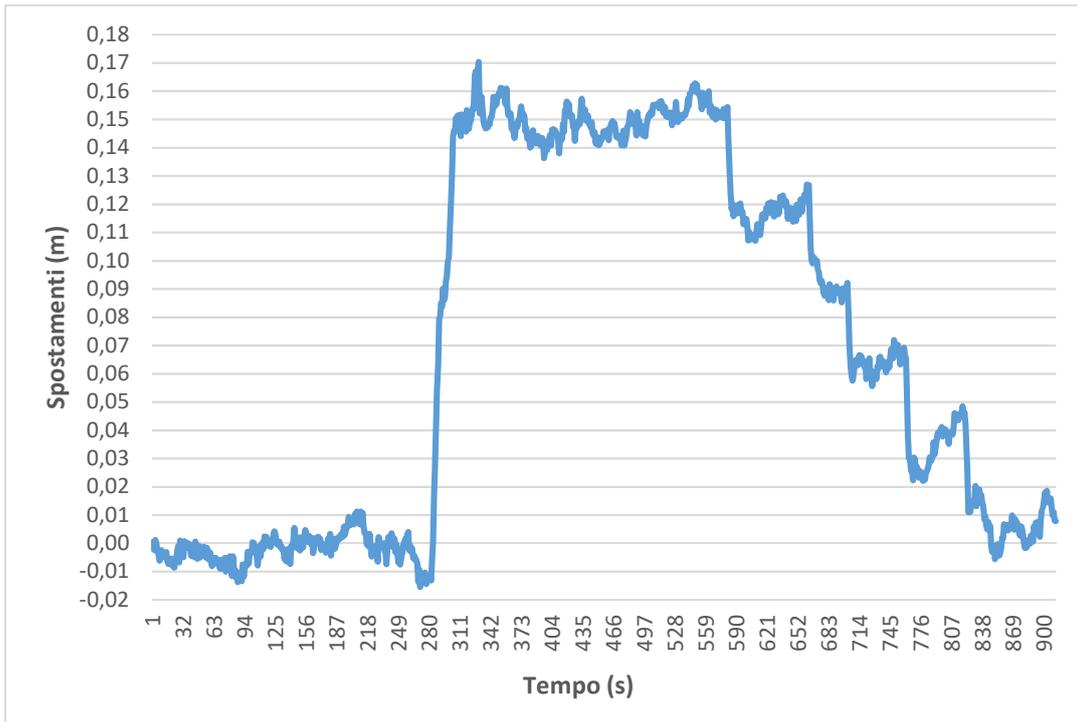


Figura 146 – Spostamenti per la prova con antenna Garmin e ricevitore U-Blox

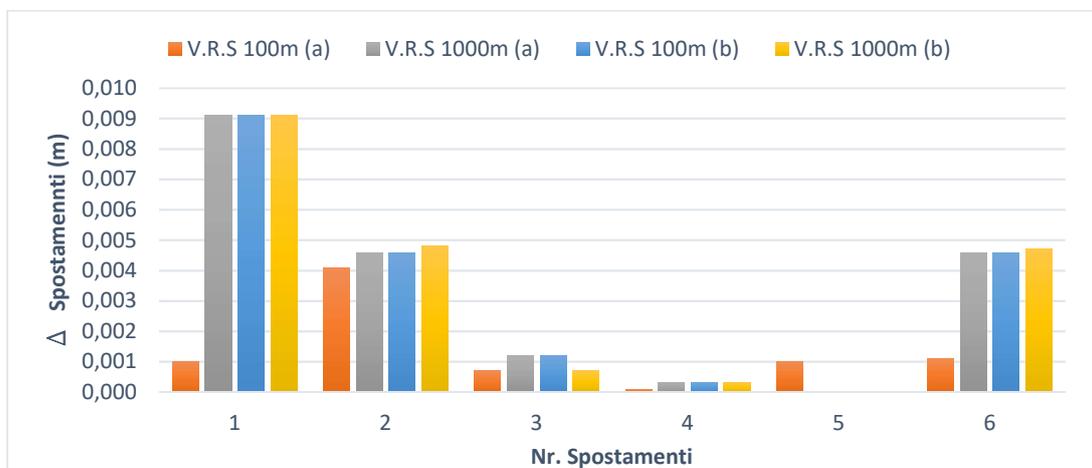


Figura 147 – Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna Garmin e ricevitore U-Blox

Nella Figura 148 sono rappresentati gli spostamenti rilevati con antenna patch e ricevitore U-Blox, dove si nota il fatto che tutti sono stati individuati e il segnale risulta essere molto rumoroso e nella Figura 149 sono presenti le differenze fra gli spostamenti rilevati e quelli effettuati, dove si nota il fatto che il dato è leggermente migliore per il V.R.S a 100m.

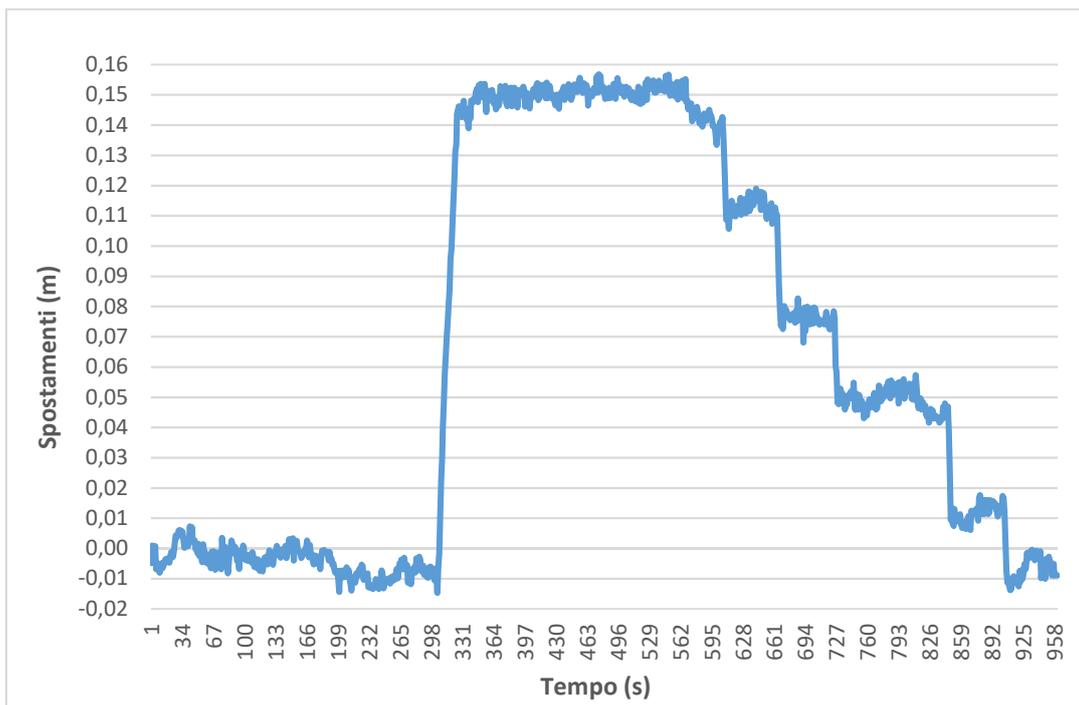


Figura 148 – Spostamenti per la prova con antenna patch e ricevitore U-Blox

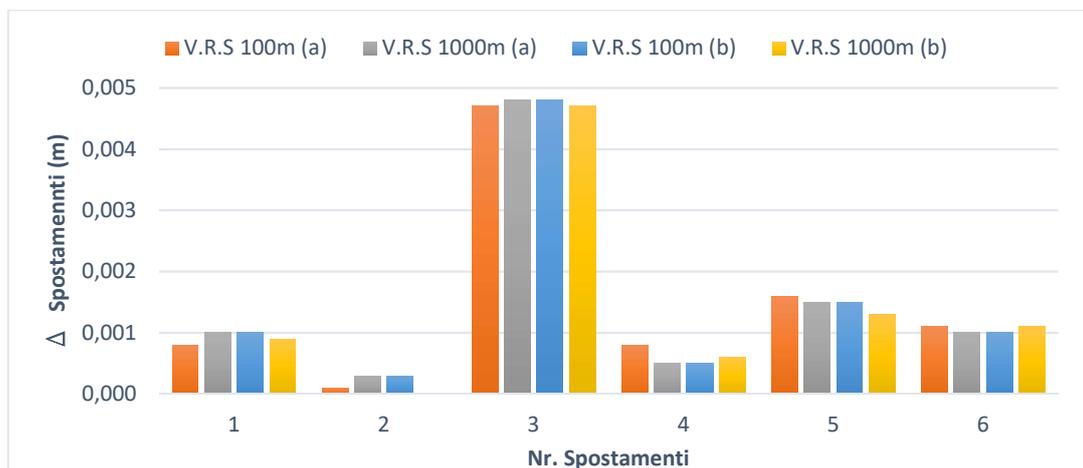


Figura 149 – Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna patch e ricevitore U-Blox

Prova	Tipo di antenna e di ricevitore	Differenze minime (m)			
		Punto a		Punto b	
		V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m	V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m
Spostamenti appartenenti tra "rapid" e "moderate", come classe di velocità	Antenna e ricevitore Leica	0,000	0,000	0,000	0,000
	Antenna Leica e ricevitore U-blox	0,000	0,000	0,000	0,000
	Antenna Garmin e ricevitore U-blox	0,000	0,000	0,000	0,000
	Antenna Patch e ricevitore U-blox	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabella 52 – Differenze minime fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati per gli spostamenti appartenenti tra la categoria "rapid" e "moderate" come classe di velocità secondo Varnes

Prova	Tipo di antenna e di ricevitore	Differenze massime(m)			
		Punto a		Punto b	
		V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m	V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m
postamenti appartenenti tra "rapid" e "moderate", come classe di velocità	Antenna e ricevitore Leica	0,003	0,004	0,002	0,004
	Antenna Leica e ricevitore U-blox	0,004	0,003	0,003	0,003
	Antenna Garmin e ricevitore U-blox	0,004	0,009	0,009	0,009
	Antenna Patch e ricevitore U-blox	0,005	0,005	0,005	0,005

Tabella 53 – Differenze massime fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati per gli spostamenti appartenenti tra la categoria "rapid" e "moderate" come classe di velocità secondo Varnes

Prova	Tipo di antenna e di ricevitore	Differenze medie (m)			
		Punto a		Punto b	
		V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m	V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m
Spostamenti appartenenti tra "rapid" e "moderate", come classe di velocità	Antenna e ricevitore Leica	0,001	0,001	0,001	0,001
	Antenna Leica e ricevitore U-blox	0,002	0,002	0,002	0,002
	Antenna Garmin e ricevitore U-blox	0,001	0,003	0,003	0,003
	Antenna Patch e ricevitore U-blox	0,002	0,002	0,002	0,001

Tabella 54 – Differenze medie fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati per gli spostamenti appartenenti tra la categoria "rapid" e "moderate" come classe di velocità secondo Varnes

Nella Tabella 52, Tabella 53 e nella Tabella 54 sono presenti i minimi, massimi e medi valori delle differenze fra gli spostamenti rilevati e quelli effettuati, dove si nota il fatto che i dati sono sensibilmente uguali per le due V.R.S e le differenze medie sono ad un massimo di 0,003m, il che significa che si è ottenuto un buon risultato per gli spostamenti appartenenti alla categoria "rapid" come classe di velocità secondo Varnes.

Prova	Tipo di ricevitore	Scarti quadratici medi (m)			
		Punto a		Punto b	
		V.R.S. 100m	V.R.S. 1.000m	V.R.S. 100m	V.R.S. 1.000m
Spostamenti appartenenti tra "rapid" e "moderate", come classe di velocità	Antenna e ricevitore Leica	0,000	0,000	0,000	0,000
	Antenna Leica e ricevitore U-blox	0,002	0,002	0,002	0,002
	Antenna Garmin e ricevitore U-blox	0,003	0,008	0,008	0,008
	Antenna Patch e ricevitore U-blox	0,004	0,004	0,004	0,004

Tabella 55 – Scarti quadratici medi per gli spostamenti appartenenti tra le categorie "rapid" e "moderate" come classe di velocità secondo Varnes

### 6.3.3 Spostamenti appartenenti alla categoria “moderate” come classe di velocità, secondo Varnes –prova 3

- Spostamenti in planimetria

Nella Figura 150, dove sono rappresentati gli spostamenti rilevati dal software RTK lib, che corrispondono al test eseguito con antenna e ricevitore Leica, si nota il fatto che sono stati individuati tutti con una buona qualità del segnale ricevuto dai satelliti. Nella Figura 151 e nella Figura 152 sono rappresentate le differenze fra gli spostamenti rilevati e quelli effettuati, dove si nota il fatto che il migliore sia per V.R.S posta a 100m.

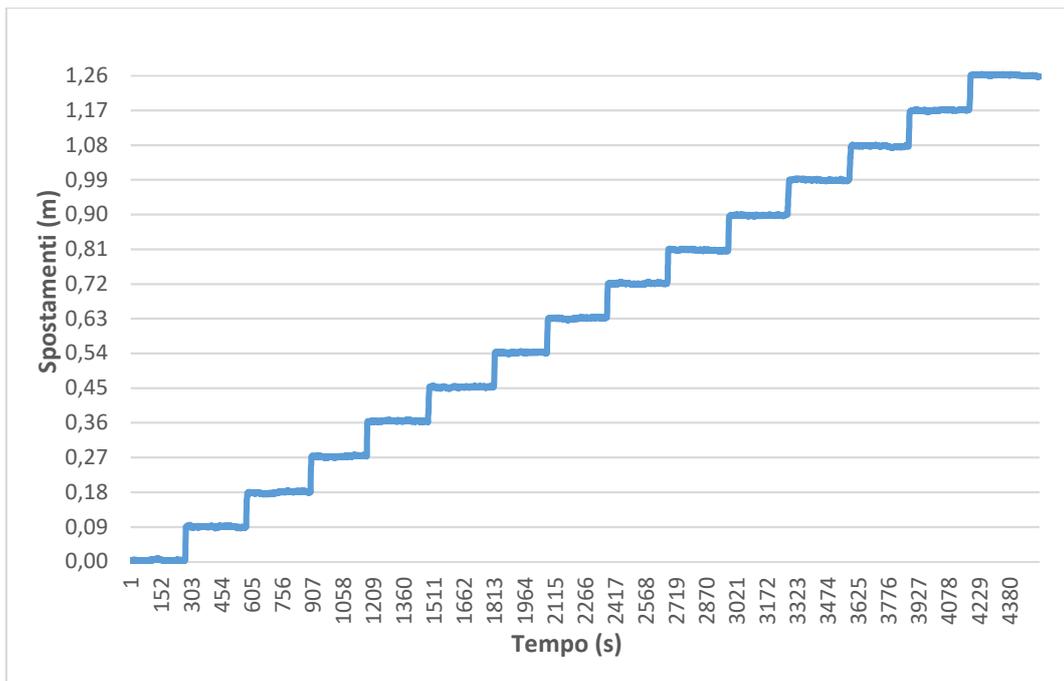


Figura 150 – Spostamenti per la prova con antenna e ricevitore Leica

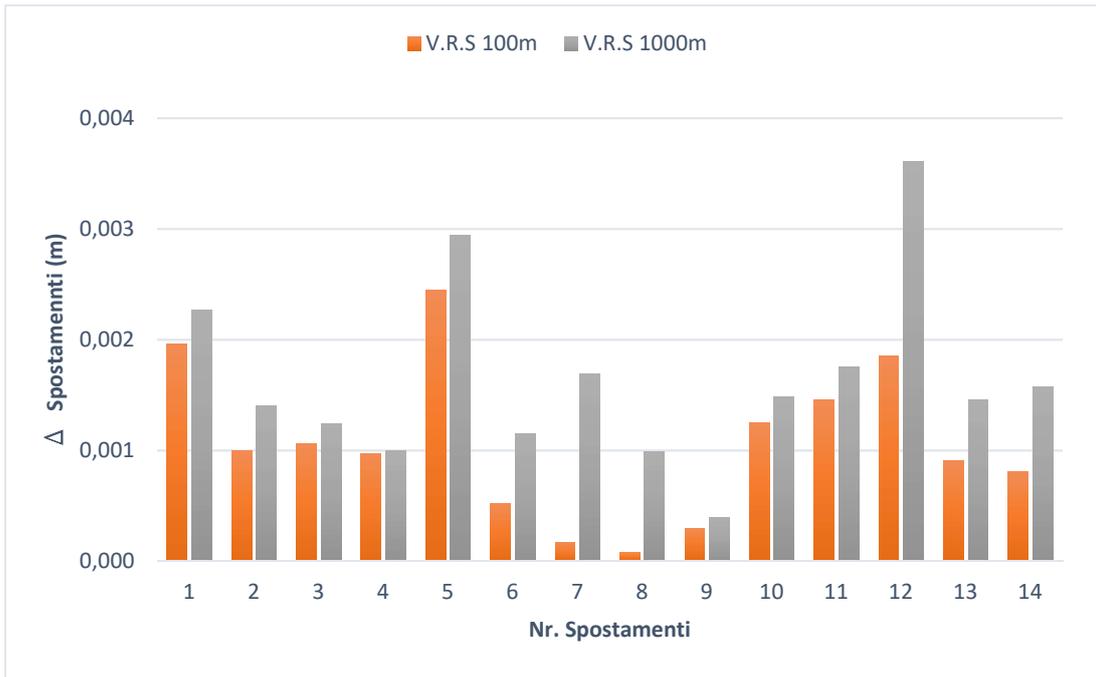


Figura 151 – Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna e ricevitore Leica – punto a

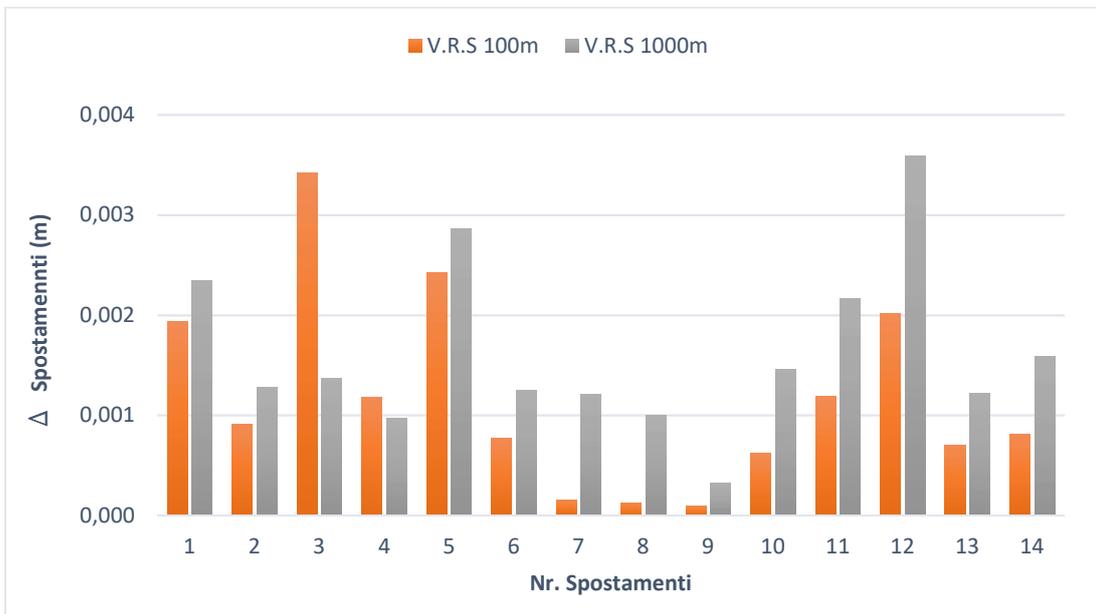


Figura 152 – Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna e ricevitore Leica – punto b

Nella Figura 153, dove sono rappresentati gli spostamenti rilevati con antenna Leica e ricevitore U-Blox, si nota il fatto che tutti sono stati trovati e la qualità del segnale ricevuto dai satelliti è buona. Nella Figura 154 e nella Figura 155, dove sono rappresentate le differenze fra gli spostamenti rilevati e quelli effettuati, si nota il fatto che le differenze fra le due V.R.S sono al di sotto del millimetro.

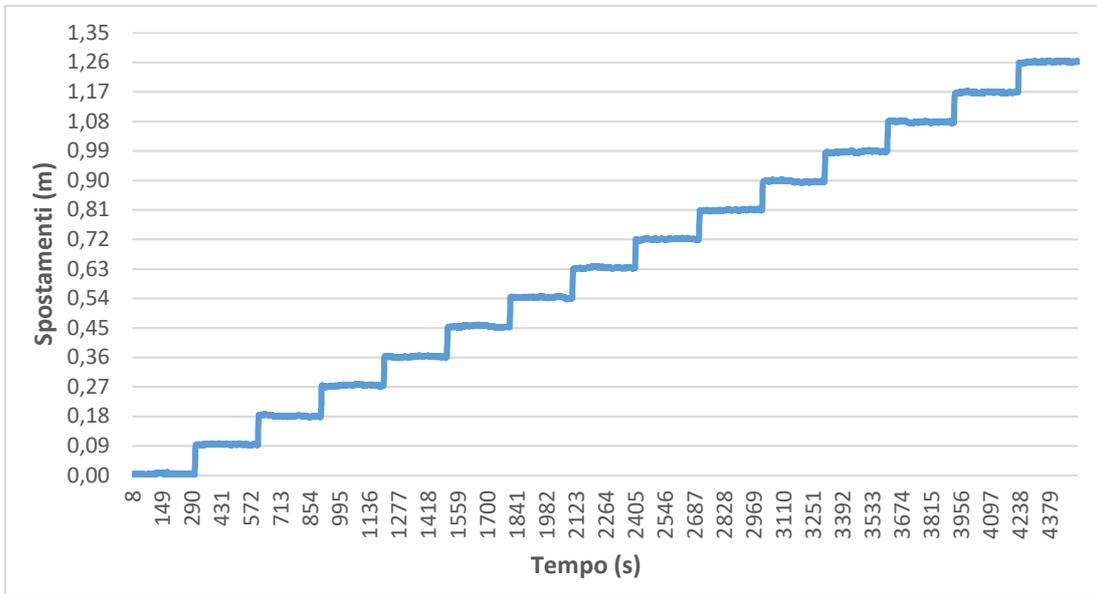


Figura 153 – Spostamenti per la prova con antenna Leica e ricevitore U-Blox

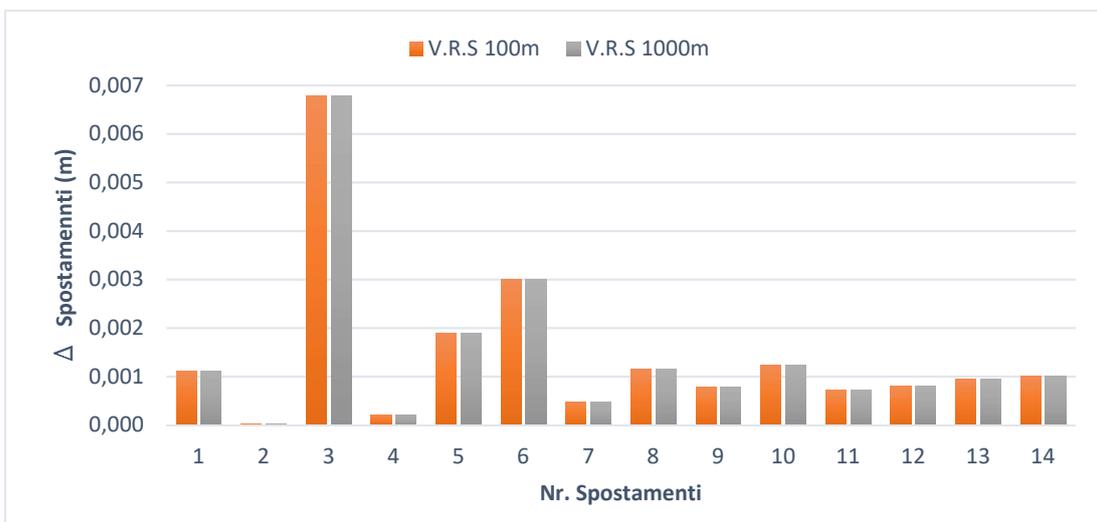


Figura 154 – Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna Leica e ricevitore U-Blox – punto a

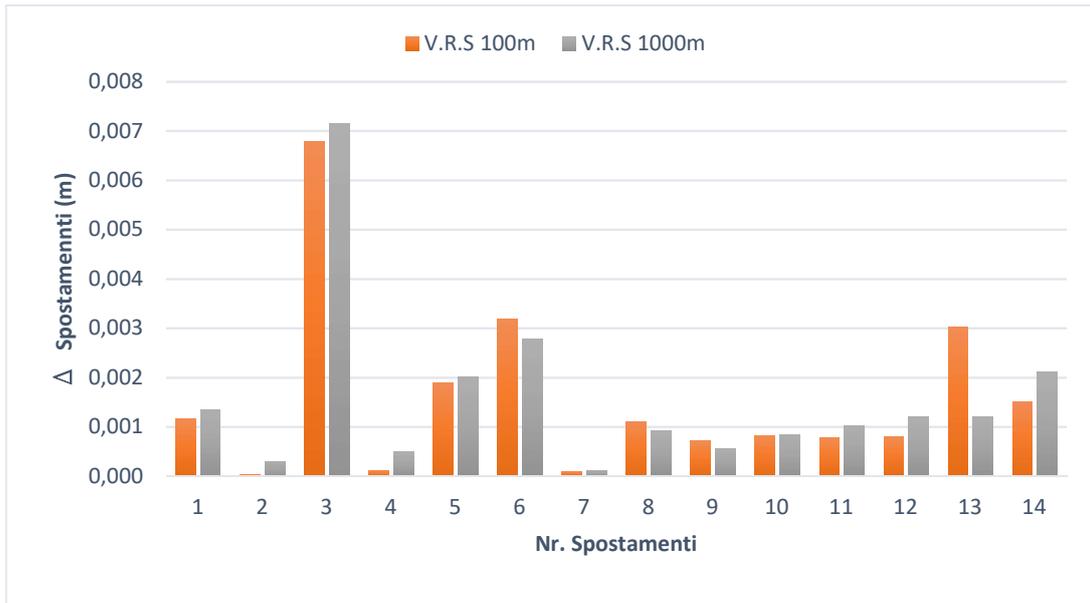


Figura 155 – Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna Leica e ricevitore U-Blox – punto b

Nella Figura 156, dove sono rappresentati gli spostamenti rilevati per la prova eseguita con antenna Garmin e ricevitore U-Blox, in seguito al trattamento del dato con RTK lib, per l'intero periodo di acquisizione dati, si nota il fatto che tutti sono stati individuati e che per i primi due spostamenti, il segnale ricevuto dai satelliti non ha una buona qualità, ovvero è molto rumoroso, e di conseguenza il dato elaborato da RTK lib è superiore a 1, per cui, il primo spostamento non può essere individuato. Nella Figura 157 e nella Figura 158, dove sono rappresentate le differenze fra gli spostamenti rilevati e quelli effettuati, si nota il fatto che non ci sono grosse differenze fra le due V.R.S.

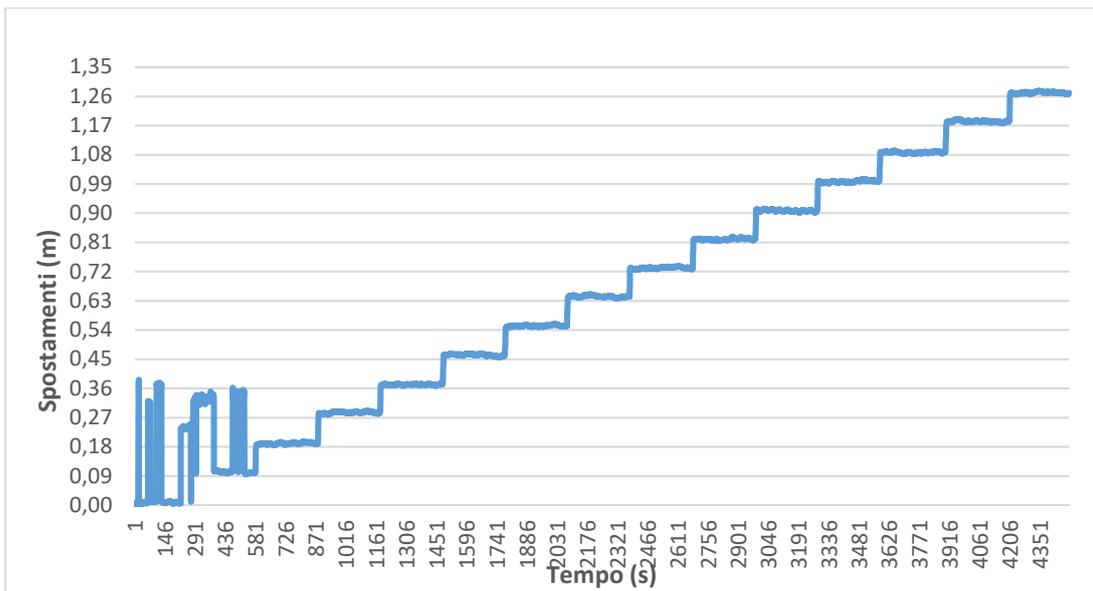


Figura 156 – Spostamenti per la prova con antenna Garmin e ricevitore U-Blox

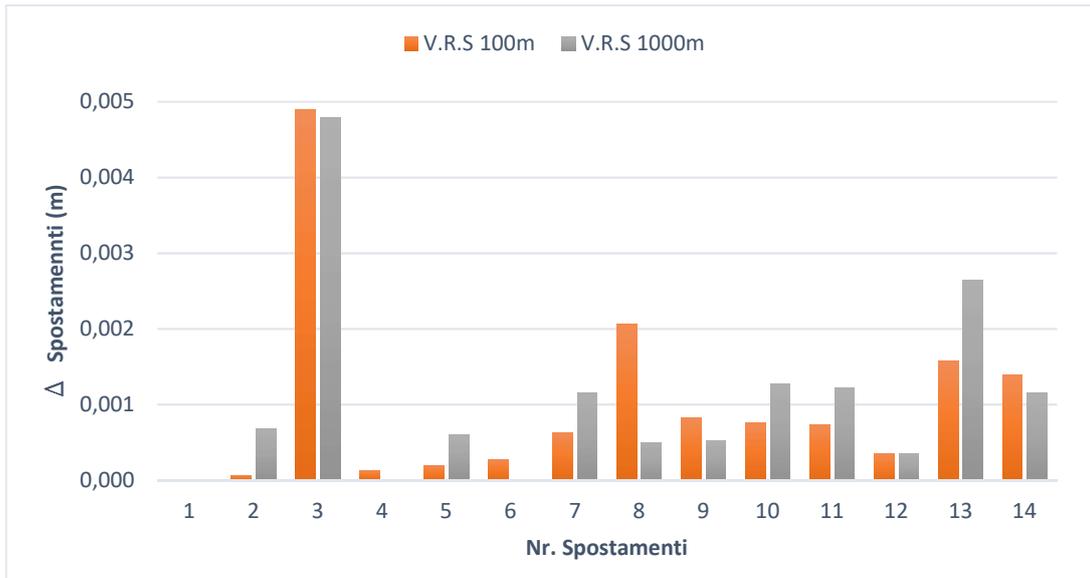


Figura 157 – Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna Garmin e ricevitore U-Blox – punto a

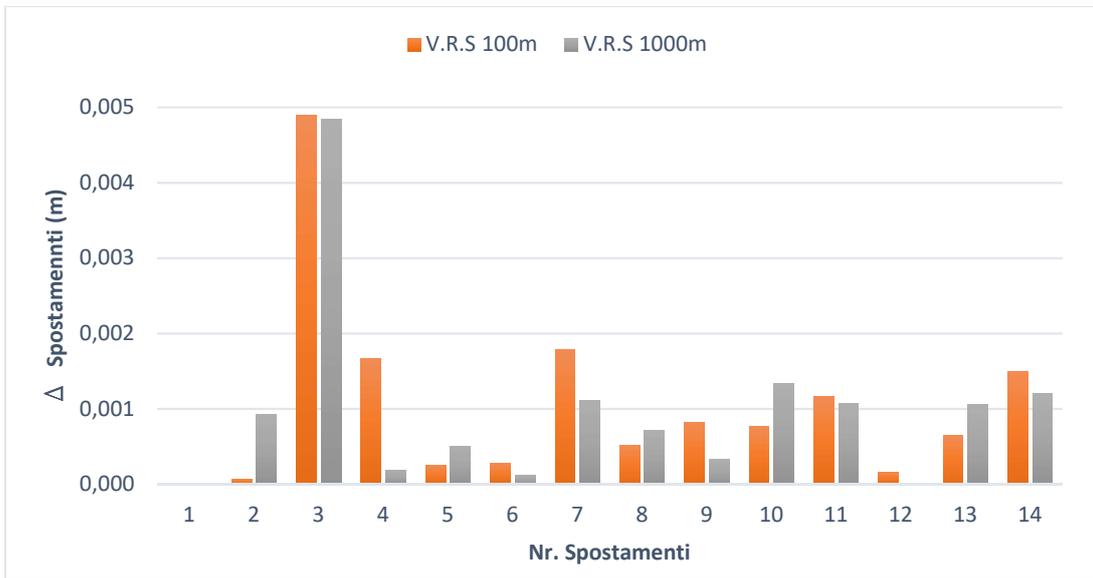


Figura 158 – Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna Garmin e ricevitore U-Blox – punto b

Nella Figura 159, dove sono rappresentati gli spostamenti rilevati corrispondenti al test eseguito con antenna patch e ricevitore U-Blox, si nota che sono stati tutti individuati e

che la qualità del segnale risulta essere buona. Nella Figura 160 e nella Figura 161, dove sono rappresentate le differenze fra gli spostamenti rilevati e quelli effettuati, si nota il fatto che le differenze fra le due V.R.S sono al di sotto del millimetro.

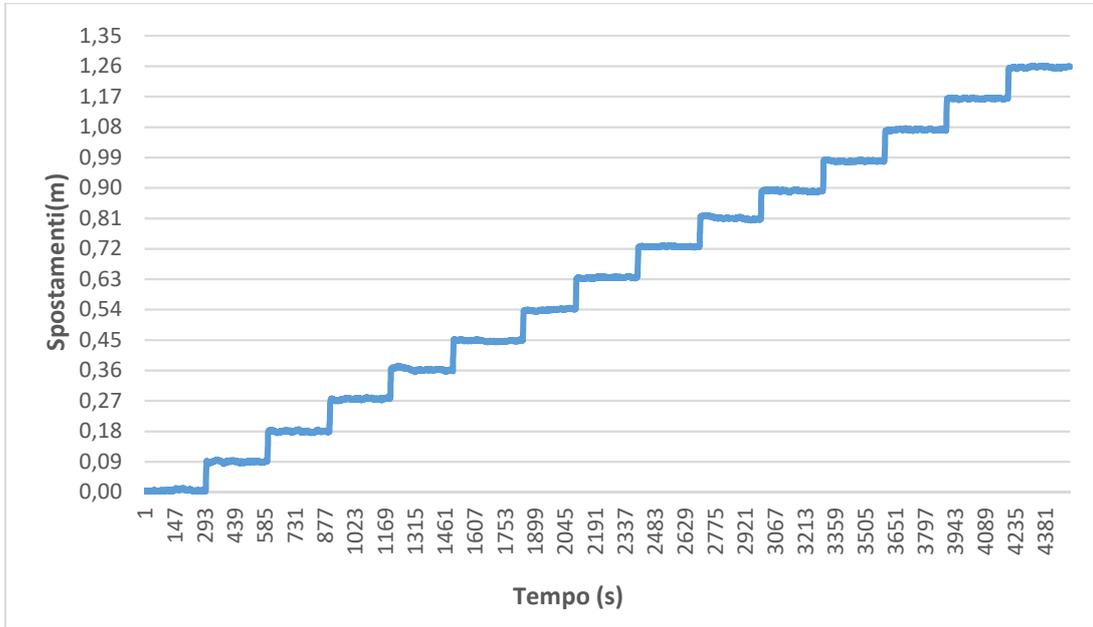


Figura 159 – Spostamenti per la prova con antenna patch e ricevitore U-Blox

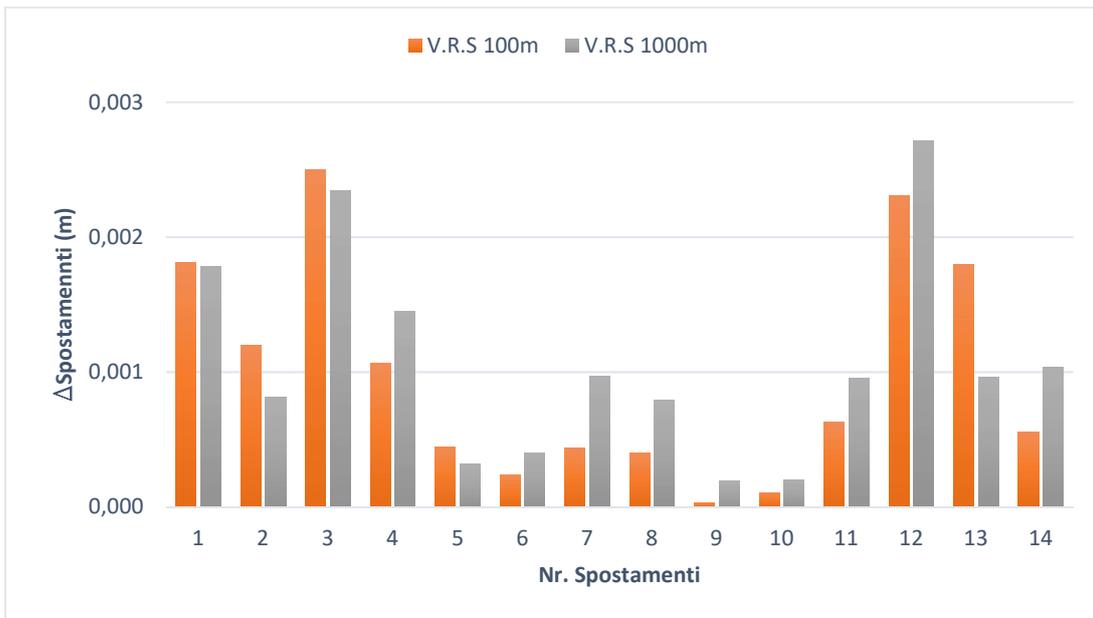


Figura 160 – Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna patch e ricevitore U-Blox – punto a

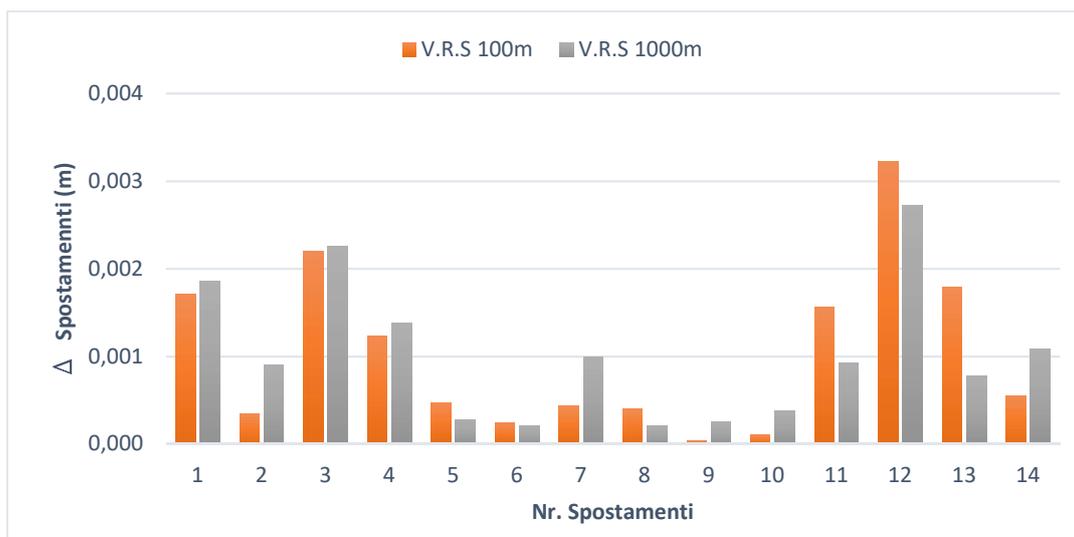


Figura 161 – Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna patch e ricevitore U-Blox – punto b

Prova	Tipo di antenna e di ricevitore	Differenze minime (m)			
		Punto a		Punto b	
		V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m	V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m
Spostamenti appartenenti a "moderate", come classe di velocità	Antenna e ricevitore Leica	0,000	0,000	0,000	0,000
	Antenna Leica e ricevitore U-blox	0,000	0,000	0,000	0,000
	Antenna Garmin e ricevitore U-blox	0,000	0,000	0,000	0,000
	Antenna Patch e ricevitore U-blox	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabella 56 – Differenze minime fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati per gli spostamenti appartenenti alla categoria "moderate" come classe di velocità

	Tipo di antenna e di ricevitore	Differenze massime(m)			
		Punto a		Punto b	
		V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m	V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m
Spostamenti appartenenti a "moderate", come classe di velocità	Antenna e ricevitore Leica	0,002	0,004	0,003	0,004
	Antenna Leica e ricevitore U-blox	0,007	0,007	0,007	0,007
	Antenna Garmin e ricevitore U-blox	0,005	0,005	0,005	0,005
	Antenna Patch e ricevitore U-blox	0,002	0,003	0,003	0,003

Tabella 57 – Differenze massime fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati per gli spostamenti appartenenti alla categoria "moderate" come classe di velocità

Prova	Tipo di antenna e di ricevitore	Differenze medie (m)			
		Punto a		Punto b	
		V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m	V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m
Spostamenti appartenenti a "moderate", come classe di velocità	Antenna e ricevitore Leica	0,001	0,001	0,002	0,002
	Antenna Leica e ricevitore U-blox	0,001	0,002	0,001	0,002
	Antenna Garmin e ricevitore U-blox	0,001	0,001	0,001	0,001
	Antenna Patch e ricevitore U-blox	0,001	0,001	0,001	0,001

Tabella 58 – Differenze medie fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati per gli spostamenti appartenenti alla categoria "moderate" come classe di velocità

Nella Tabella 56, Tabella 57 e nella Tabella 58 sono presenti i valori delle differenze minime, massime e medie fra gli spostamenti rilevati e quelli effettuati, dove si nota il fatto

che non ci sono le differenze fra le due V.R.S, ad eccezione degli spostamenti eseguiti con antenna e ricevitore Leica, dove il dato migliore si è ottenuto con V.R.S a 100m.

Prova	Tipo di antenna e ricevitore	Scarti quadratici medi (m)			
		Punto a		Punto b	
		V.R.S. 100m	V.R.S. 1.000m	V.R.S. 100m	V.R.S. 1.000m
Spostamenti appartenenti a "moderate", come classe di velocità	Antenna e ricevitore Leica	0,004	0,005	0,004	0,006
	Antenna Leica e ricevitore U-blox	0,004	0,004	0,003	0,004
	Antenna Garmin e ricevitore U-blox	0,002	0,000	0,000	0,001
	Antenna Patch e ricevitore U-blox	0,002	0,002	0,003	0,002

Tabella 59 – Scarti quadratici medi per gli spostamenti appartenenti alla categoria "moderate" come classe di velocità, in planimetria

- Spostamenti in altimetria

Nella Figura 162, dove sono rappresentati gli spostamenti rilevati per il test eseguito con antenna e ricevitore Leica, si nota che sono stati tutti individuati e il segnale presenta un rumore che arriva anche a 0,002m. Con tutto ciò, da come si può osservare dal grafico seguente, il software è stato in grado di individuare lo spostamento con una differenza fra lo spostamento trovato e quello effettuato pari a zero, vale a dire che si è ottenuto un buon risultato.

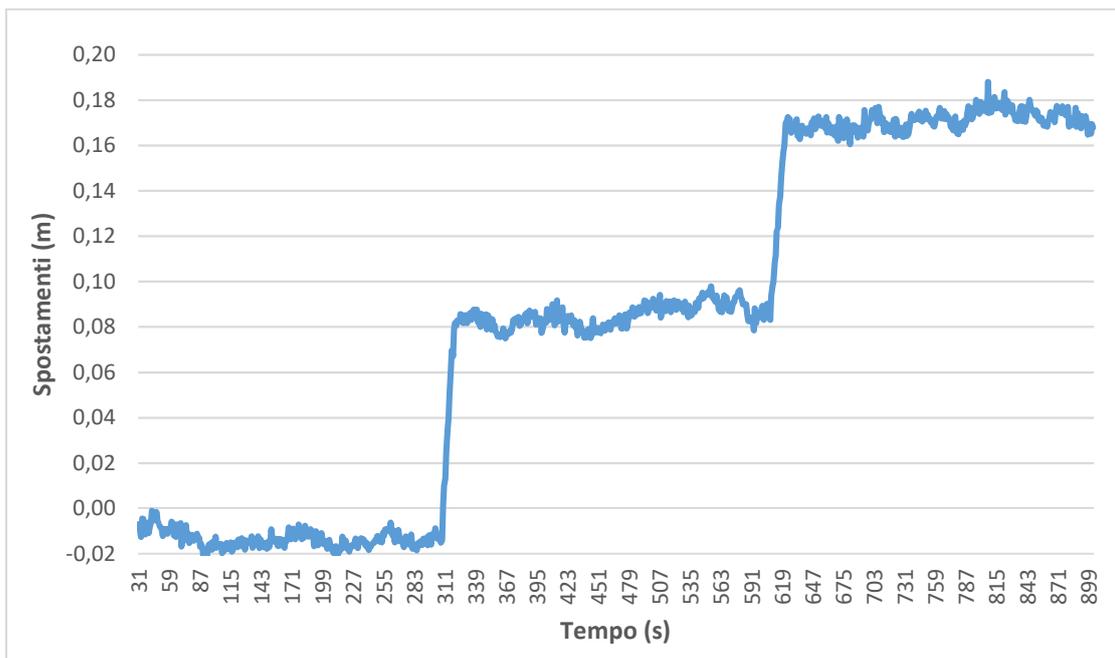


Figura 162 – Spostamenti per la prova con antenna e ricevitore Leica

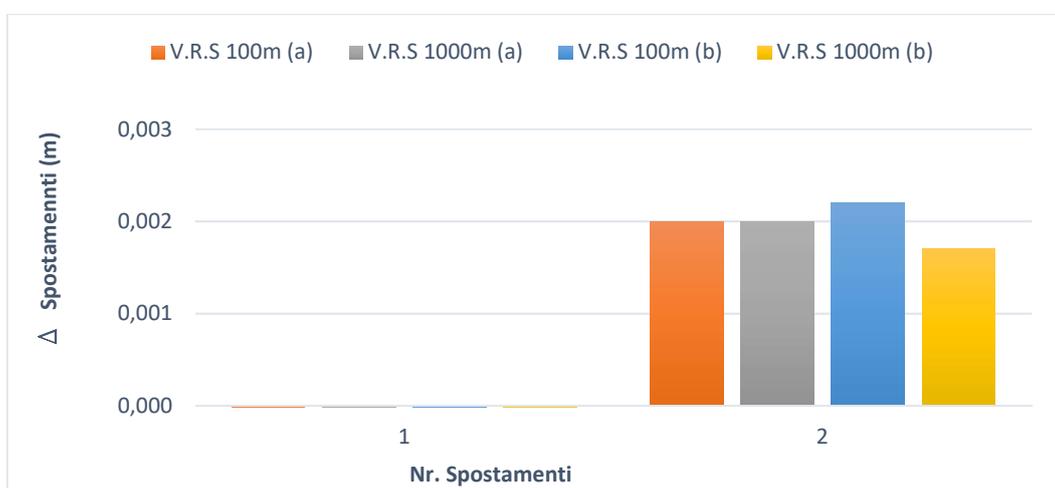


Figura 163 – Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna e ricevitore Leica

Nella Figura 164, dove sono rappresentati gli spostamenti rilevati per il test eseguito con antenna Leica e ricevitore U-Blox, si nota il fatto che sono stati tutti individuati e il segnale presenta un rumore che arriva anche a 0,002m. Con tutto ciò, le differenze fra gli spostamenti rilevati e quelli effettuati, presenti nel grafico seguente, sono di un massimo di 0,002m. Si nota il fatto che non ci sono differenze fra le due V.R.S.

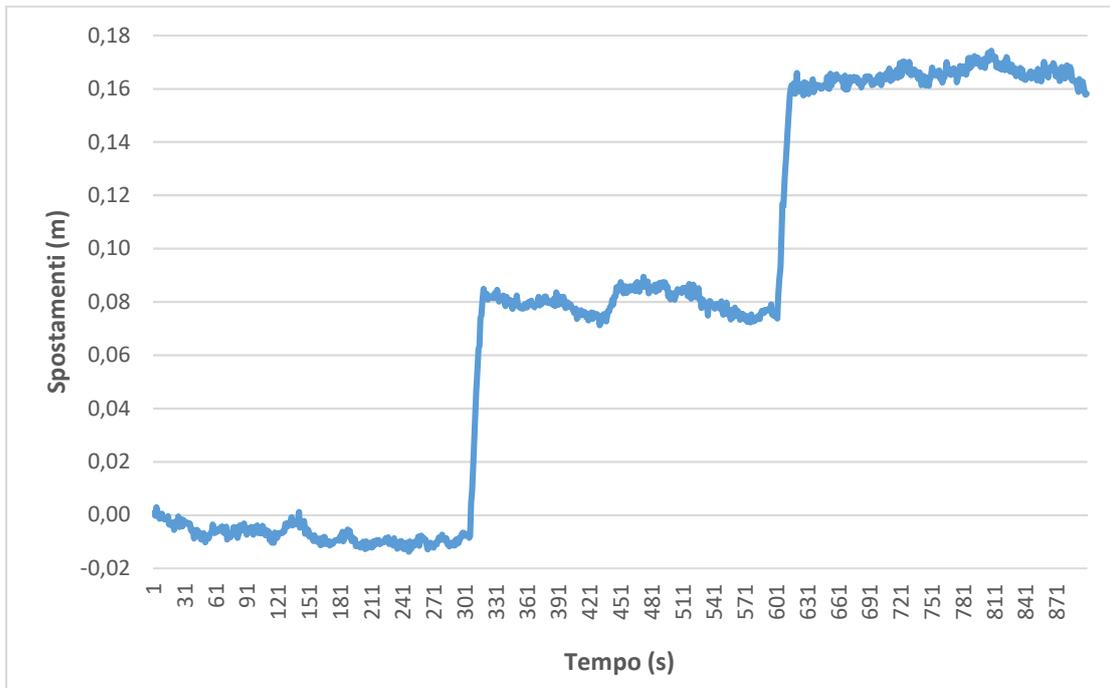


Figura 164 – Spostamenti per la prova con antenna Leica e ricevitore U-Blox

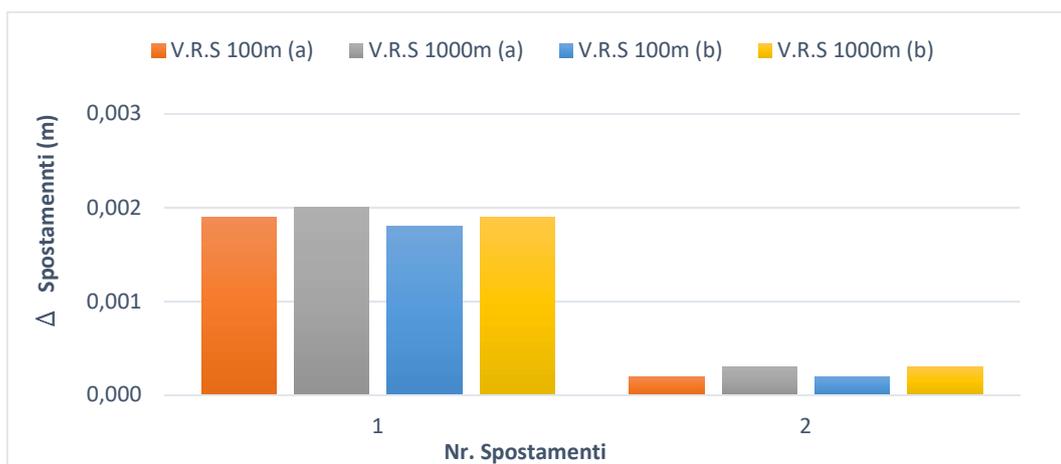


Figura 165 – Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna Leica e ricevitore U-Blox

Nella Figura 166, dove sono rappresentati gli spostamenti rilevati in seguito al test eseguito con antenna Garmin e ricevitore U-Blox, si nota la rumorosità del segnale, che in questo caso arriva ad un massimo di 0,003m. Le differenze fra gli spostamenti rilevati e quelli effettuati sono simili per le due V.R.S.

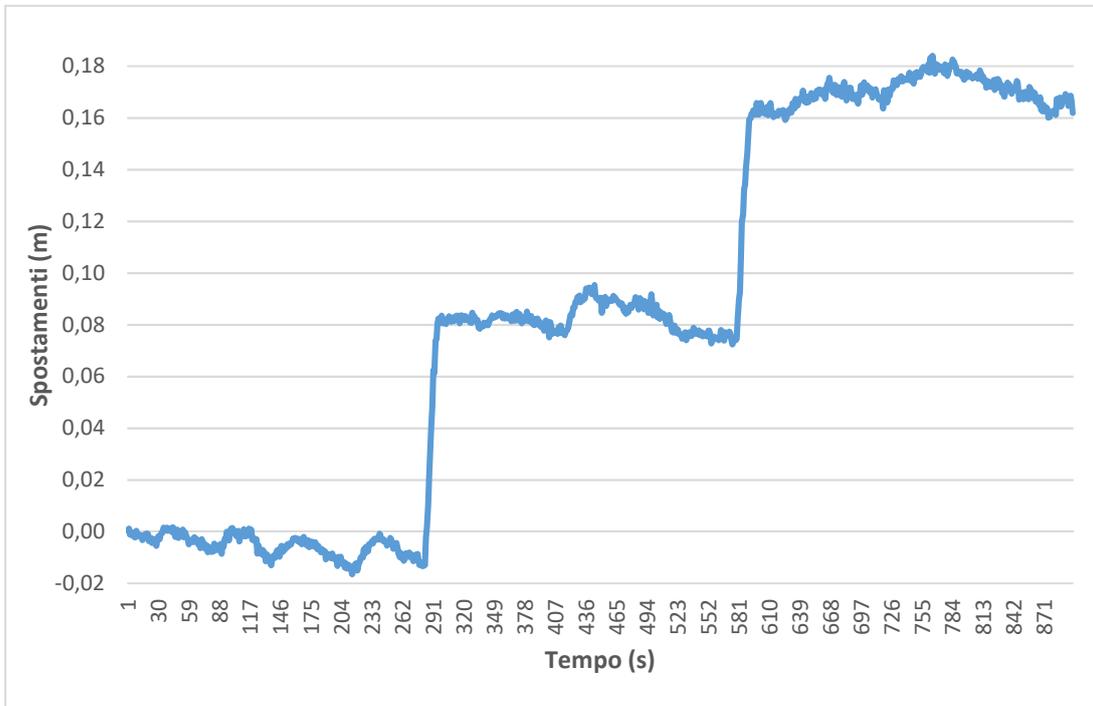


Figura 166 – Spostamenti per la prova con antenna Garmin e ricevitore U-Blox

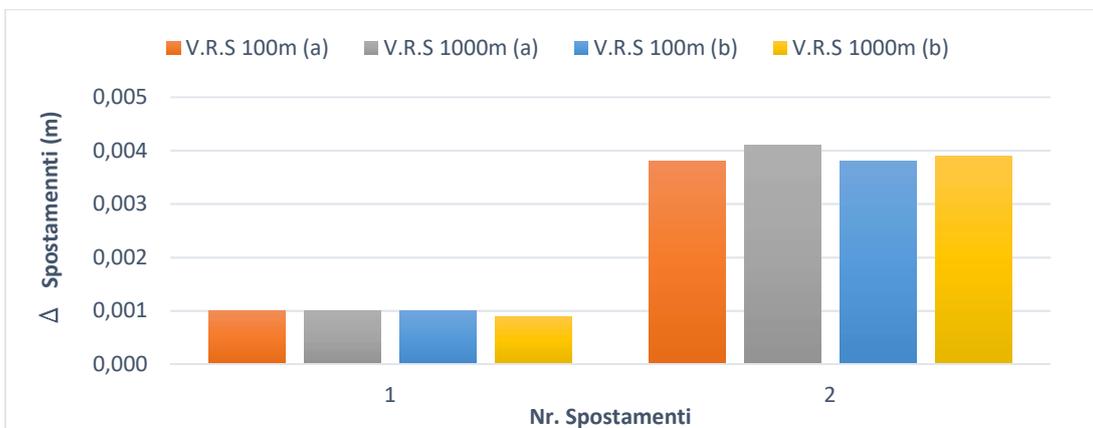


Figura 167 – Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna Garmin e ricevitore U-Blox

Nella Figura 168, dove sono rappresentati gli spostamenti rilevati in seguito al test eseguito con antenna patch e ricevitore U-Blox, si nota la rumorosità del segnale, che arriva ad un massimo di 0,003m. Anche se c'è la presenza del rumore nel segnale, dalla Figura 169 si nota che la differenza fra gli spostamenti rilevati e quelli effettuati arriva ad un massimo di 0,002m e per il secondo spostamento il dato migliore si è ottenuto con V.R.S a 100.

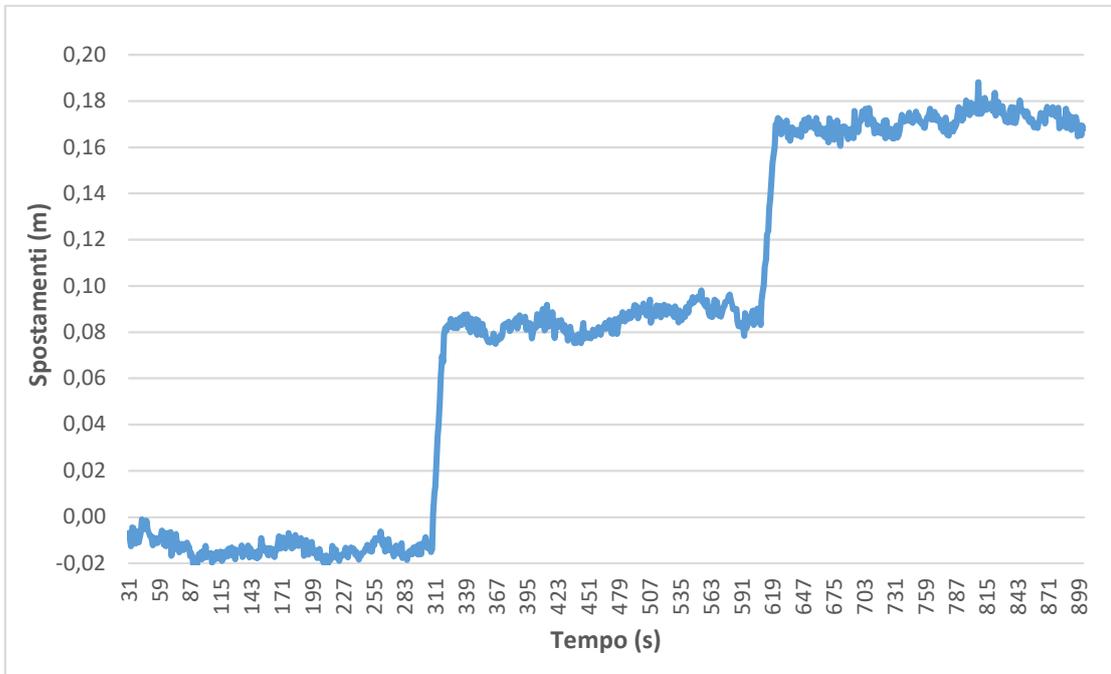


Figura 168 – Spostamenti per la prova con antenna patch e ricevitore U-Blox

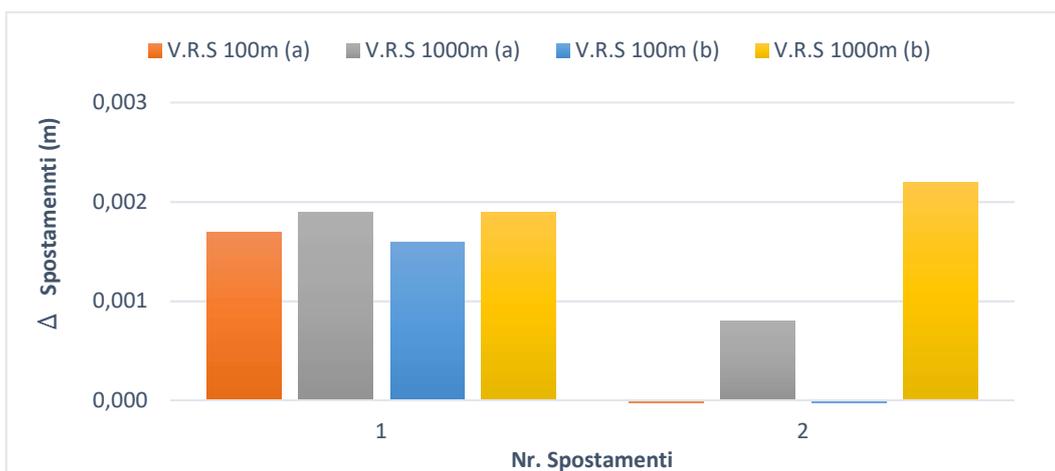


Figura 169 – Differenze fra gli spostamenti effettuati e quelli rilevati con antenna patch e ricevitore U-Blox

Prova	Tipo di antenna e di ricevitore	Differenze minime (m)			
		Punto a		Punto b	
		V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m	V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m
Spostamenti appartenenti a "moderate", come classe di velocità	Antenna e ricevitore Leica	0,000	0,000	0,000	0,000
	Antenna Leica e ricevitore U-blox	0,000	0,000	0,000	0,000
	Antenna Garmin e ricevitore U-blox	0,001	0,001	0,001	0,001
	Antenna Patch e ricevitore U-blox	0,000	0,001	0,000	0,002

Tabella 60 – Differenze minime fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati per gli spostamenti appartenenti alla categoria "moderate" come classe di velocità

Prova	Tipo di antenna e di ricevitore	Differenze massime(m)			
		Punto a		Punto b	
		V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m	V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m
Spostamenti appartenenti a "moderate", come classe di velocità	Antenna e ricevitore Leica	0,002	0,002	0,002	0,002
	Antenna Leica e ricevitore U-blox	0,002	0,002	0,002	0,002
	Antenna Garmin e ricevitore U-blox	0,004	0,004	0,004	0,004
	Antenna Patch e ricevitore U-blox	0,002	0,002	0,002	0,002

Tabella 61 – Differenze massime fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati per gli spostamenti appartenenti alla categoria "moderate" come classe di velocità

Prova	Tipo di antenna e di ricevitore	Differenze medie (m)			
		Punto a		Punto b	
		V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m	V.R.S. 100m	V.R.S. 1000m
Spostamenti appartenenti a "moderate", come classe di velocità	Antenna e ricevitore Leica	0,001	0,001	0,001	0,001
	Antenna Leica e ricevitore U-blox	0,001	0,001	0,001	0,001
	Antenna Garmin e ricevitore U-blox	0,002	0,003	0,002	0,002
	Antenna Patch e ricevitore U-blox	0,001	0,001	0,001	0,002

Tabella 62 – Differenze medie fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati per gli spostamenti appartenenti alla categoria "moderate" come classe di velocità

Nella Tabella 60, Tabella 61 e nella Tabella 62 dove sono presenti le differenze minime, massime e medie fra gli spostamenti rilevati e quelli effettuati, si nota che per questa categoria di spostamenti non ci sono differenze per le due V.R.S e per le due baselines (punto a e punto b).

Prova	Tipo di antenna e di ricevitore	Scarti quadratici medi (m)			
		Punto a		Punto b	
		V.R.S. 100m	V.R.S. 1.000m	V.R.S. 100m	V.R.S. 1.000m
Spostamenti appartenenti alla "moderate", come classe di velocità	Antenna e ricevitore Leica	0,001	0,001	0,001	0,001
	Antenna Leica e ricevitore U-blox	0,001	0,002	0,001	0,002
	Antenna Garmin e ricevitore U-blox	0,003	0,004	0,003	0,003
	Antenna Patch e ricevitore U-blox	0,001	0,001	0,001	0,003

Tabella 63 – Scarti quadratici medi per gli spostamenti appartenenti alla categoria "moderate" come classe di velocità, in altimetria

#### **6.3.4 Spostamenti appartenenti alla categoria “slow” come classe di velocità, secondo Varnes – prove 4 e 5**

Gli spostamenti per questa classe di velocità sono stati di 0,005m ogni 20 minuti e di 0.002m ogni 20 minuti, per un totale di 5 spostamenti, ovvero lo spostamento complessivo è stato di 0,025m e di 0.01m. Dalla Figura 170 dove si presenta la soluzione in modalità cinematica per il dato acquisito con antenna e ricevitore Leica, per lo spostamento di 0.005m ogni 20 minuti, si nota il fatto che lo spostamento c'è, però non si può distinguere il suo momento e la sua entità. Una causa di un dato di questo genere può essere che il rumore del segnale arrivi fino a 9 mm, che si somma allo spostamento reale. Siccome la modalità del trattamento del dato in cinematico, con l'ausilio del programma RTK lib genera una soluzione per ogni secondo, questo rumore si somma per ogni istante. Nello stesso tempo l'entità del rumore cambia per ogni secondo, per cui risulta difficile, se non impossibile, fare la differenza fra lo spostamento effettivo e il rumore. Allo stesso tempo, la qualità ottenuta è superiore a 1 per il 25% del dato, che va eliminata e dove la qualità del dato è 1 si è ottenuto uno spostamento complessivo di 0,04m rispetto a 0,025m quanto è realmente effettuato. Le stesse considerazioni valgono anche per lo spostamento effettuato di 0.002m ogni 20 minuti.

Anche per gli spostamenti effettuati con antenna Leica e ricevitore U-Blox, antenna Garmin e ricevitore U\_blox e antenna patch e ricevitore U-Blox i grafici generati a seguito delle soluzioni generate dal software RTL lib, risultano essere simili.

Tutto il ragionamento fatto, vale anche per gli spostamenti eseguiti in altimetria, dove nella Figura 171 sono presentati gli spostamenti eseguiti con antenna e ricevitore Leica, per lo spostamento effettuato di 0.005m ogni 20 minuti e nella Figura 173, dove sono presentati gli spostamenti eseguiti con antenna e ricevitore Leica, per lo spostamento effettuato di 0.002m ogni 20 minuti.

Per lo spostamento eseguito in altimetria, lo spostamento reale complessivo ricavato in seguito al trattamento del dato in modalità cinematica con l'ausilio del software RTK lib, arriva ad essere di circa 0,04m rispetto a 0,025m, quanto realmente è stato effettuato e, per gli spostamenti di 0.002m ogni 20 minuti non si può identificare lo spostamento complessivo.

Per gli spostamenti appartenenti a “slow” come classe di velocità, l'utilizzo dei ricevitori e antenne sia a doppia frequenza sia a singola frequenza, presenta un grado di riserva, che nelle conclusioni va spiegato.

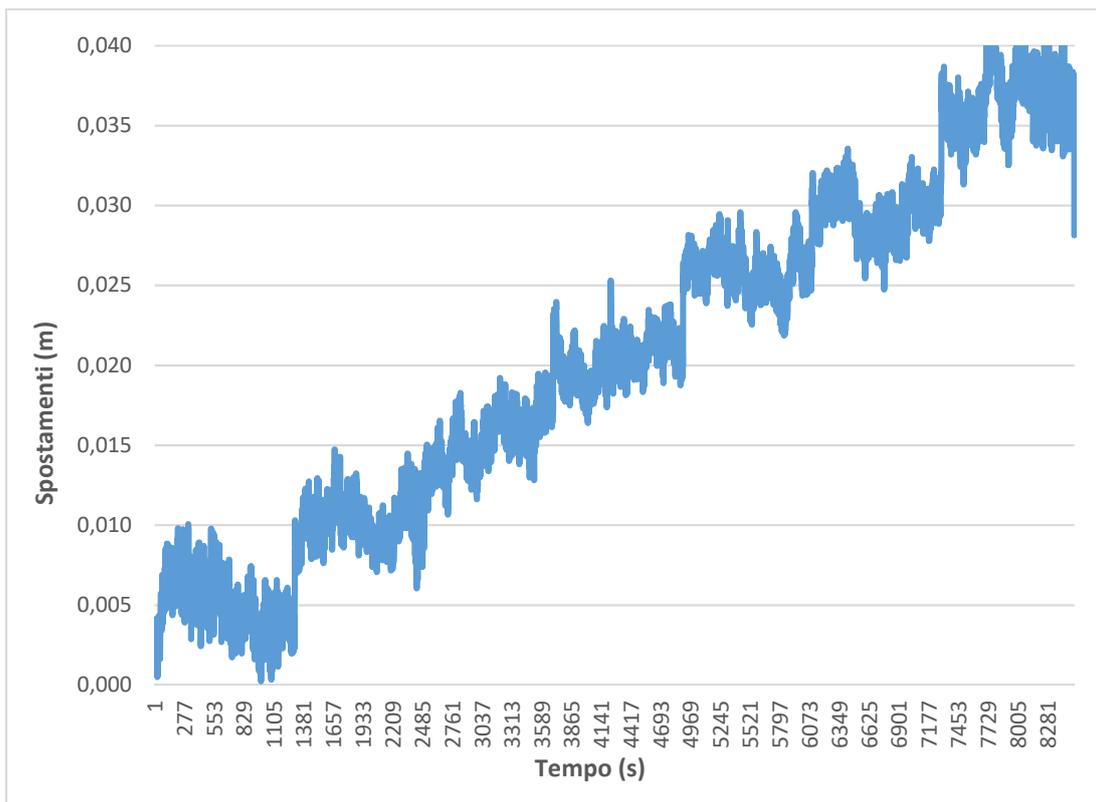


Figura 170 – Spostamenti per la prova in planimetria con antenna e ricevitore Leica per la prova 4

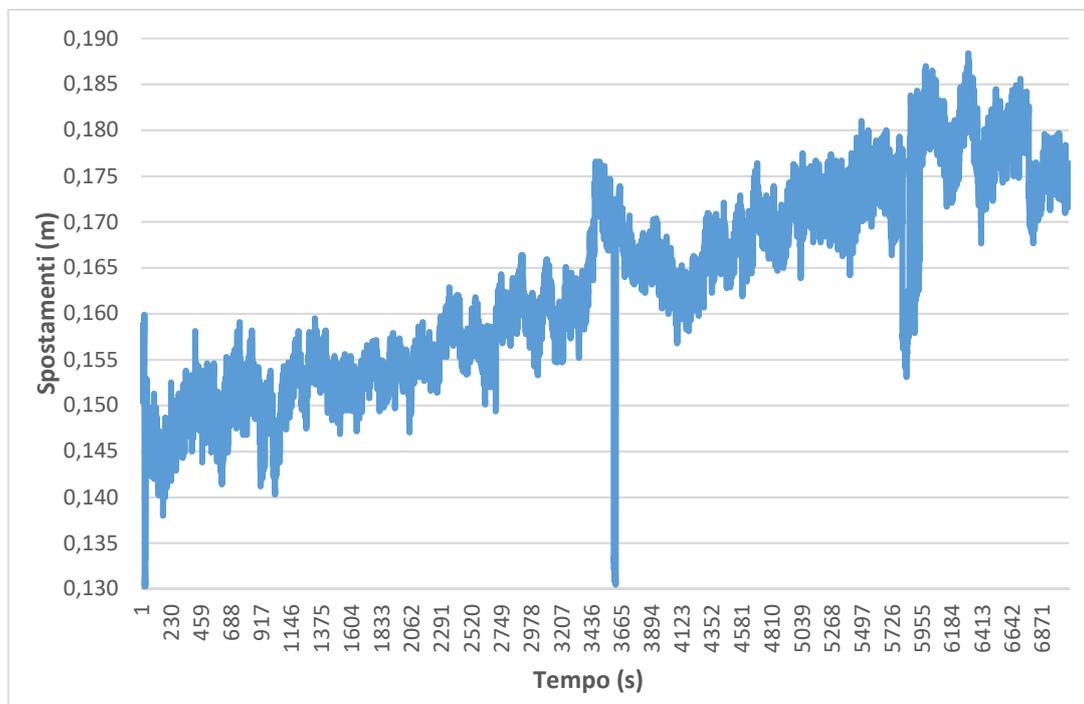


Figura 171 – Spostamenti per la prova in altimetria con antenna e ricevitore Leica per la prova 4

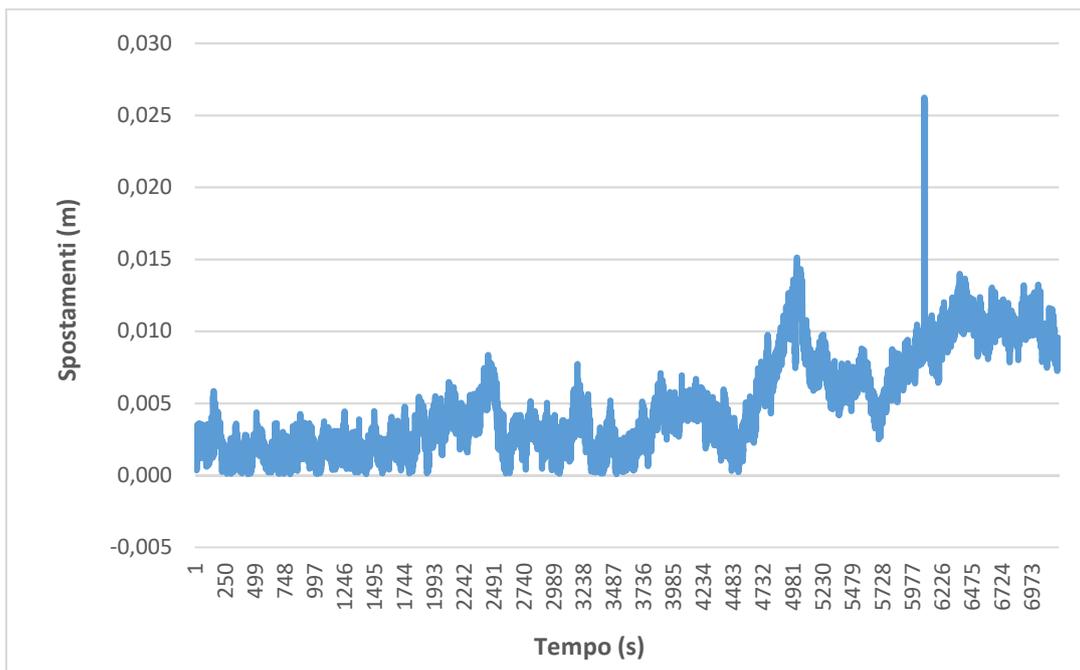


Figura 172 – Spostamenti per la prova in planimetria con antenna e ricevitore Leica per la prova 5

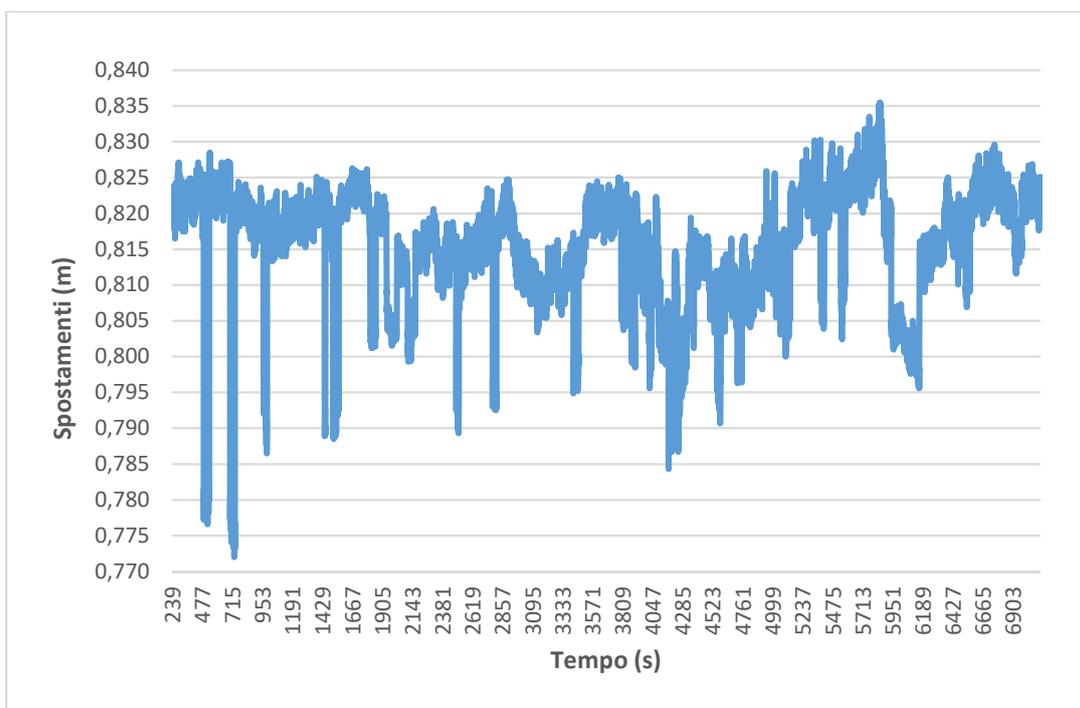


Figura 173 – Spostamenti per la prova in altimetria con antenna e ricevitore Leica per la prova 5

#### 6.4 Confronto tra i risultati ottenuti con i software LGO e RTK lib per il trattamento dei dati in modalità cinematica

Categoria di spostamento	Differenze medie (m)					
	V.R.S 100m			V.R.S 1000m		
	LGO	RTK lib		LGO	RTK lib	
		Punto a	Punto b		Punto a	Punto b
"Rapid"	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Tra "Rapid" e "moderate"	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,002
"Moderate"	0,001	0,001	0,002	0,004	0,001	0,002

Tabella 64 – Confronto dei risultati per gli spostamenti eseguiti in planimetria

Categoria di spostamento	Differenze medie (m)					
	V.R.S 100m			V.R.S 1000m		
	LGO	RTK lib		LGO	RTK lib	
		Punto a	Punto b		Punto a	Punto b
"Rapid"	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,002
Tra "Rapid" e "moderate"	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
"Moderate"	0,003	0,001	0,001	0,003	0,001	0,001

Tabella 65 – Confronto dei risultati per gli spostamenti eseguiti in altimetria

Nella Tabella 64 e nella Tabella 65, dove sono presentati i risultati delle differenze medie, ottenuti con i due software utilizzati nel trattamento dei dati, per gli spostamenti rispettivamente in planimetria e in altimetria, si nota il fatto che i due software forniscono risultati simili, quindi l'uso dell'uno o dell'altro rappresenta una scelta indipendente dalle precisioni che si vogliono ottenere.

Nella Tabella 66, dove sono indicate le diverse combinazioni utilizzate nei test nella presente tesi, che, in base alle precisioni ottenute, si presenta la possibilità di utilizzo o meno. Come già presentato in precedenza, l'uso del software LGO o RTK lib, comporta dei risultati simili.

Modalità di trattamento dati	Tipo di antenna e ricevitore	Classe di velocità, secondo la classificazione di Varnes			
		Rapid (1.8 m/h – 3m/s)	Tra rapid e moderate (1.8 m/h)	Moderate (13 m/mese – 1.8m/h)	Slow (1.6m/anno – 13 m/mese)
<b>Statico</b>	Antenna e ricevitore a doppia frequenza	SI	SI	SI	Con riserva
	Antenna a doppia frequenza e ricevitore a singola frequenza	SI	SI	SI	Con riserva
	Antenna e ricevitore a singola frequenza	SI	SI	SI	Con riserva
	Antenna e ricevitore a singola frequenza e basso costo	SI	SI	SI	Con riserva
<b>Cinematico con LGO</b>	Antenna e ricevitore a doppia frequenza	SI	SI	SI	NO
	Antenna a doppia frequenza e ricevitore a singola frequenza	NO	NO	NO	NO
	Antenna e ricevitore a singola frequenza	NO	NO	NO	NO
	Antenna e ricevitore a singola frequenza e basso costo	NO	NO	NO	NO
<b>Cinematico con RTK lib</b>	Antenna e ricevitore a doppia frequenza	SI	SI	SI	Con riserva
	Antenna a doppia frequenza e ricevitore a singola frequenza	SI	SI	SI	Con riserva
	Antenna e ricevitore a singola frequenza	SI	SI	SI	Con riserva
	Antenna e ricevitore a singola frequenza e basso costo	SI	SI	SI	Con riserva

Tabella 66 - Possibilità o meno di utilizzo dei vari ricevitori e antenne per i vari spostamenti effettuati

# Conclusioni

Lo scopo della presente tesi era quello di analizzare i limiti e le capacità dei ricevitori GNSS per il monitoraggio delle frane, considerando differenti variabili come la combinazione tra antenne e ricevitori (doppia e singola frequenza), costo della strumentazione (alto, medio e basso), modalità diverse di posizionamento (statica e cinematica) e differenti strategie per il trattamento dei dati (parametri di processing e software utilizzati).

I test eseguiti hanno preso come riferimento, in termini di range di velocità, un caso reale vale a dire la frana di Montaguto, ubicata in Italia, più precisamente in Campania. Per questa frana, sono stati messi a disposizione, da parte del CNR-IRPI (sede Torino) una serie di dati di monitoraggio acquisiti da tre diverse stazioni totali nel periodo compreso tra 2007 e 2010.

L'analisi delle prestazioni della strumentazione GNSS è stata fatta con l'ausilio di una slitta micrometrica, utilizzando diversi ricevitori e diverse antenne, con precisioni e costi differenti e con sessioni di misura diverse, in base ai dati del monitoraggio corrispondenti per la frana di Montaguto. Le sessioni di misura sono state stabilite in base alle classi di velocità della classificazione di Varnes.

Per raggiungere lo scopo, sono stati fissati degli obiettivi:

- Analizzare i dati forniti dal CNR-IRPI per la frana di Montaguto.
- Definire il setup delle prove in base agli spostamenti e alle velocità istantanee calcolate precedentemente.
- Valutare la precisione spaziale dei vari sistemi di acquisizione dati, con diversi tipi di ricevitori e diverse antenne GNSS e per i vari tipi di posizionamento.
- Creare una matrice di correlazione tra spostamento e tipologie di tecnica GNSS utilizzata.

Per tutte le configurazioni considerate, si è elaborato il dato con un processamento statico e cinematico, impiegando due software: LGO e RTK Lib.

Per ogni prova sono stati creati dei progetti e con l'impiego dei software LGO e RTK lib ed è stato eseguito il trattamento dei dati al fine di trovare e quantificare ogni spostamento effettuato.

Per il trattamento dei dati in modalità statica si è utilizzato il software LGO, che ha generato una soluzione per ogni spostamento effettuato. Le precisioni ottenute con il trattamento dei dati in modalità statica sono millimetriche per le categorie di spostamenti appartenenti alle classi "rapid", tra "rapid" e "moderate", "moderate" sia in planimetria che in altimetria, ad eccezione della categoria tra "rapid" e "moderate", per planimetria, dove si è ottenuta una precisione centimetrica - 0.014 m. Per gli spostamenti appartenenti alla categoria "slow" come classe di velocità secondo Varnes le precisioni ottenute superano lo spostamento realmente effettuato, la differenza fra gli spostamenti trovati e quelli effettuati arriva a essere di 0,005 m, per le prove effettuate in planimetria e di 0,014 m per gli spostamenti effettuati in altimetria, di conseguenza, questo tipo di trattamento non offre

una soluzione attendibile per questa categoria di spostamenti, ovvero 0,006 m/h. Dato che lo spostamento trovato in seguito all'analisi del dato in modalità statica utilizzando le effemeridi broadcast supera lo spostamento realmente effettuato, si è proceduto con il trattamento dei dati utilizzando le effemeridi precise, ottenendosi in leggero miglioramento, ovvero la differenza fra gli spostamenti arriva a essere di 0.003 m in planimetria e di 0,009 m in altimetria, non considerato sufficiente.

Il trattamento in modalità cinematica è stato effettuato con i software LGO e RTK Lib, che hanno generato una soluzione per ogni secondo di acquisizione dati.

Il trattamento dei dati in modalità cinematica con l'ausilio del software LGO è stato possibile solo per i test effettuati con la prima configurazione: antenna e ricevitore geodetico. Per le altre configurazioni ricevitore-antenna, utilizzate nel presente lavoro, il software non è stato in grado di generare una soluzione, in quanto non fissa l'ambiguità di fase e non compensa la rete. Anche per questo tipo di trattamento, le precisioni ottenute sono millimetriche per le categorie di spostamenti appartenenti alle classi "rapid", tra "rapid" e "moderate" e "moderate" sia in planimetria che in altimetria, ad eccezione della categoria tra "rapid" e "moderate", dove si è ottenuta una precisione centimetrica. Per gli spostamenti appartenenti alla categoria "slow" come classe di velocità, il software LGO utilizzato per il trattamento dei dati, è in grado di generare una soluzione attendibile, in quanto fissa l'ambiguità di fase e compensa la rete, con tutto ciò, lo spostamento complessivo ottenuto arriva a essere compreso tra 0,35 m e 0,5 m, rispetto al 0,025 m, quanto realmente è stato effettuato. Per quanto riguarda i singoli spostamenti, non possono essere quantificati.

Il trattamento dei dati in modalità cinematica con l'ausilio del software RTKLib è stato possibile per tutte le configurazioni utilizzate nel presente lavoro, generando una soluzione per ogni secondo di acquisizione dati e per i due punti relativi alle VRS (a e b). Come per il trattamento dei dati in modalità cinematica con il software LGO, anche per il trattamento con il software RTKLib, la precisione ottenuta risulta essere millimetrica per le prime categorie di spostamenti effettuati, sia in planimetria che in altimetria. Per la categoria "slow", come classe di velocità anche il software RTK Lib, come LGO, non è stato in grado di individuare e quantificare gli spostamenti effettuati e lo spostamento complessivo risulta essere di 0,25 m rispetto al 0,025 m, quanto realmente è stato effettuato.

I risultati ottenuti in seguito alle prove effettuate e al processamento dei dati con i diversi software sono molto incoraggianti, rimanendo aperto il problema degli spostamenti appartenenti alla classe di velocità "slow". Per questa classe di velocità, i risultati non sono quelli attesi, quindi l'approccio per questi tipi di spostamento deve essere diverso. Dato che nei dati raccolti e processati si è rivelato il fatto che non si fissa l'ambiguità di fase e di conseguenza non si compensa la rete, per poter estrarre l'entità dello spostamento, un primo approccio potrebbe essere di allungare le finestre temporali da 20 minuti, come utilizzato nel presente lavoro, a un'ora, in questo modo è possibile avere un fissaggio dell'ambiguità di fase, per avere dei risultati che possono essere considerati attendibili.

Per quanto riguarda il tipo di trattamento dei dati di monitoraggio dei fenomeni franosi, sia la modalità statica, che la modalità cinematica può essere impiegata con buone precisioni, ad eccezione della categoria di spostamenti appartenenti alla classe "slow", la scelta di uno o l'altro tipo di trattamento dipende dalla disponibilità del software, dato che LGO è un software commerciale invece RTK Lib è un software a libero accesso. I risultati ottenuti con i due software sono molto simili.

Dall'analisi svolta nella presente tesi, emerge il fatto che i ricevitori e le antenne utilizzati, compresi quelli appartenenti ad una fascia di prezzo economica, compresa tra 100 e 200€, possono essere utilizzati nel monitoraggio dei fenomeni franosi, fino alla categoria "moderate", come classe di velocità secondo Varnes.

Per quanto riguarda la lunghezza minima della sessione di misura, dall'analisi svolta risulta il fatto che per il trattamento del dato in modalità statica, una lunghezza minima di 1 minuto offre una buona precisione (con una differenza fra lo spostamento effettuato e quello trovato di massimo 0.012 m) per la categoria "rapid", invece per le altre categorie, fino a "moderate" come classe di velocità la lunghezza minima della sessione di misura risulta essere di 5 minuti.

Per il trattamento del dato in modalità cinematica, dall'analisi svolta risulta il fatto che, con una lunghezza minima della sessione di misura di 1 minuto si possono ottenere delle buone precisioni per le categorie di spostamenti fino a "moderate", come classe di velocità.

L'impiego di uno o l'altro dipende dalla precisione che si vuole ottenere e dal tipo di frana da monitorare. Se il monitoraggio avviene con combinazione ricevitore - antenna a doppia frequenza, il trattamento dei dati può essere effettuato sia in modalità statica che in modalità cinematica, invece per le altre configurazioni ricevitori-antenne, solo in modalità cinematica.

Se è una frana con movimenti che non presentano pericolo di crollo e/o ribaltamento si possono utilizzare i ricevitori e antenne a doppia frequenza, che hanno un costo maggiore e il segnale ricevuto dai satelliti ha una migliore qualità, invece se la frana presenta pericolo di crollo e/o ribaltamento si utilizzano i ricevitori e le antenne a singola frequenza che danno buoni risultati nel processo di monitoraggio, pur avendo un costo inferiore. In caso di eventi improvvisi si possono verificare il danneggiamento o la perdita di ricevitori e antenne, e in questo caso, il danno economico sarebbe minore.

GNSS (Global Navigation Satellite System) che è il sistema di posizionamento basato sulla ricezione dei segnali radio trasmessi da diverse costellazioni di satelliti artificiali, insieme ai vari ricevitori e antenne che possono ricevere i segnali su una o più frequenze costituiscono un buon strumento per il monitoraggio dei fenomeni franosi offrendo delle precisioni che arrivano al millimetro. Allo stesso tempo, questi strumenti possono affiancare con buoni risultati i sistemi tradizionali di monitoraggio.

Dato che le costellazioni satellitari sono in espansione, ovvero in futuro si prevedono nuovi satelliti sulle orbite di ciascuna costellazione, anche i ricevitori e le antenne avranno a disposizione maggior numero di satelliti e di conseguenza il segnale ricevuto sarà migliore. Inoltre saranno a disposizione nuove frequenze, (L5 e L2C) che offriranno maggiore precisione per il monitoraggio dei fenomeni franosi utilizzando dei ricevitori e antenne, sia singola, doppia frequenza e a basso costo.

# Appendice

## Trattamento dei dati – Frana di Montaguto

Nel capitolo 4 della presente tesi, in base ai dati forniti da CNR-ISPRI, sono state presentati i risultati del calcolo degli spostamenti per il prisma 1<sub>B</sub>. Nel presente appendice si presenta il calcolo effettuato per i restanti prismi presi nell'analisi, ovvero i prismi: 4<sub>B</sub>, 8<sub>B</sub> e 13<sub>B</sub>.

### 1 I risultati del calcolo per il prisma 4<sub>B</sub>

<i>Nr. Prisma</i>	<i>Periodo (mese)</i>	<i>Spostamenti mensili cumulati(m)</i>			<i>Spostamenti mensili (m)</i>		
		<b>Dx</b>	<b>Dy</b>	<b>Dz</b>	<b>Dx</b>	<b>Dy</b>	<b>Dz</b>
<b>4<sub>B</sub></b>	Giugno	0,009	0,017	0,023	0,009	0,017	0,023
	Luglio	1,548	5,972	0,040	1,539	5,956	0,016
	Agosto	1,552	5,990	0,053	0,004	0,017	0,014
	Settembre	5,281	13,622	3,402	3,729	7,633	3,349
	Ottobre	5,257	13,588	3,408	0,024	0,034	0,006
	Novembre	5,246	13,571	3,399	0,011	0,018	0,009
	Dicembre	5,246	13,541	3,387	0,001	0,030	0,012

*Tabella 67 - Spostamenti mensili cumulati e mensili per il prisma 4<sub>B</sub>*

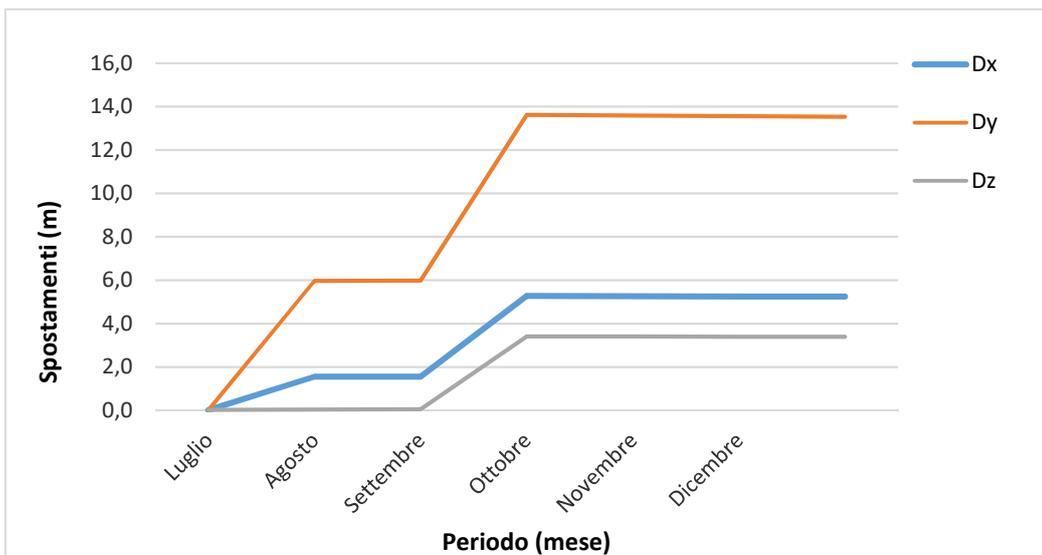


Figura 174 - Spostamenti mensili cumulati per il prisma 4<sub>B</sub>

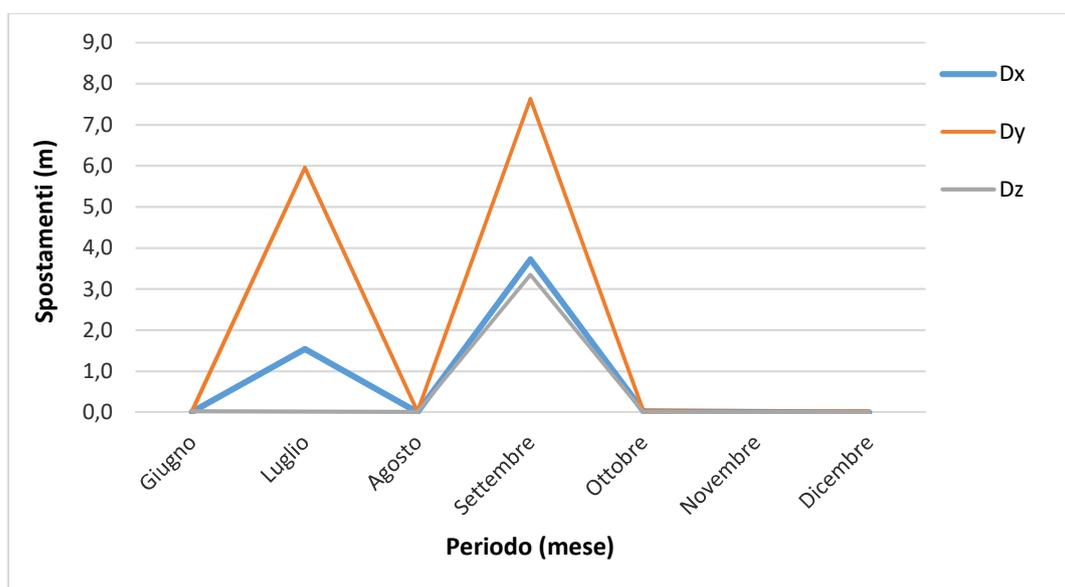


Figura 175 - Spostamenti mensili per il prisma 4<sub>B</sub>

Nr. Prisma	Periodo (mese)	Spostamenti giornalieri cumulati(m)			Spostamenti giornalieri (m)		
		Dx	Dy	Dz	Dx	Dy	Dz
4 <sub>B</sub>	Giugno	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001
	Luglio	0,070	0,271	0,002	0,070	0,271	0,001
	Agosto	0,050	0,193	0,002	0,000	0,001	0,000
	Settembre	0,211	0,545	0,136	0,149	0,305	0,134
	Ottobre	0,202	0,523	0,131	0,001	0,001	0,000
	Novembre	0,175	0,452	0,113	0,000	0,001	0,000
	Dicembre	0,175	0,451	0,113	0,000	0,001	0,000

Tabella 68 - Spostamenti giornalieri cumulati e giornalieri per il prisma 4<sub>B</sub>

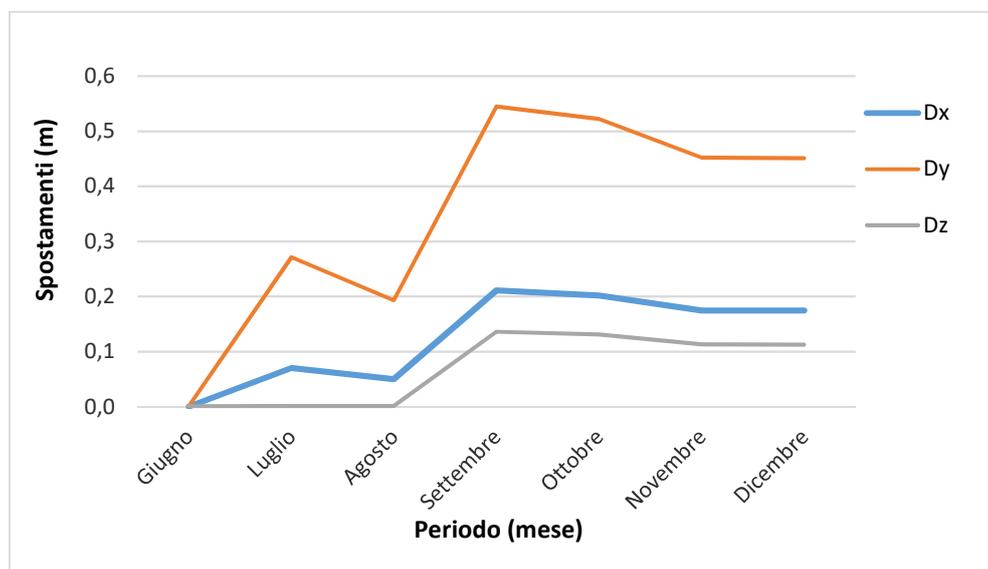


Figura 176 - Spostamenti giornalieri cumulati per il prisma 4<sub>B</sub>

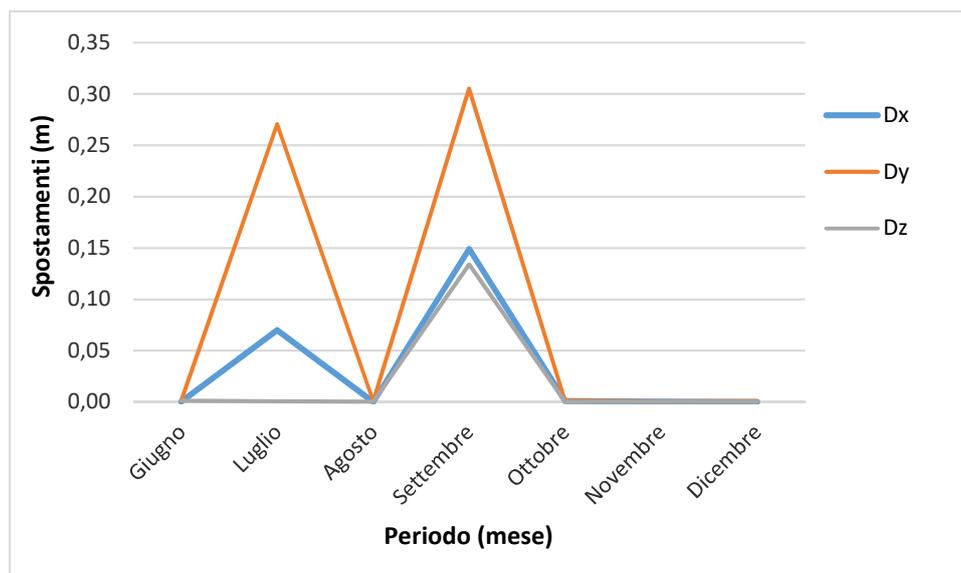


Figura 177 - Spostamenti giornalieri per il prisma 4<sub>B</sub>

Nr. Prisma	Periodo (mese)	Nr. giorni effettivi di misurazione	Velocità istantanee (m/s) minime			Velocità istantanee (m/s) massime		
			Vx	Vy	Vz	Vx	Vy	Vz
4 <sub>B</sub>	Giugno	20	8,94E-09	4,09E-07	1,28E-06	1,79E-04	2,25E-04	7,46E-04
	Luglio	22	1,31E-07	1,73E-08	2,44E-07	6,64E-03	2,63E-02	5,82E-04
	Agosto	31	2,92E-08	5,54E-08	5,98E-08	1,33E-04	1,10E-04	5,86E-04
	Settembre	25	3,85E-08	7,42E-09	5,88E-07	1,73E-04	1,87E-04	9,48E-04
	Ottobre	26	2,75E-07	3,80E-08	5,40E-07	1,23E-04	1,32E-04	4,28E-04
	Novembre	30	8,66E-09	6,34E-08	3,00E-08	1,34E-04	1,12E-04	6,56E-04
	Dicembre	30	4,08E-09	4,82E-08	0,00E+00	1,39E-03	7,27E-04	2,06E-03

Tabella 69 - Velocità istantanee minime e massime per il prisma 4<sub>B</sub>

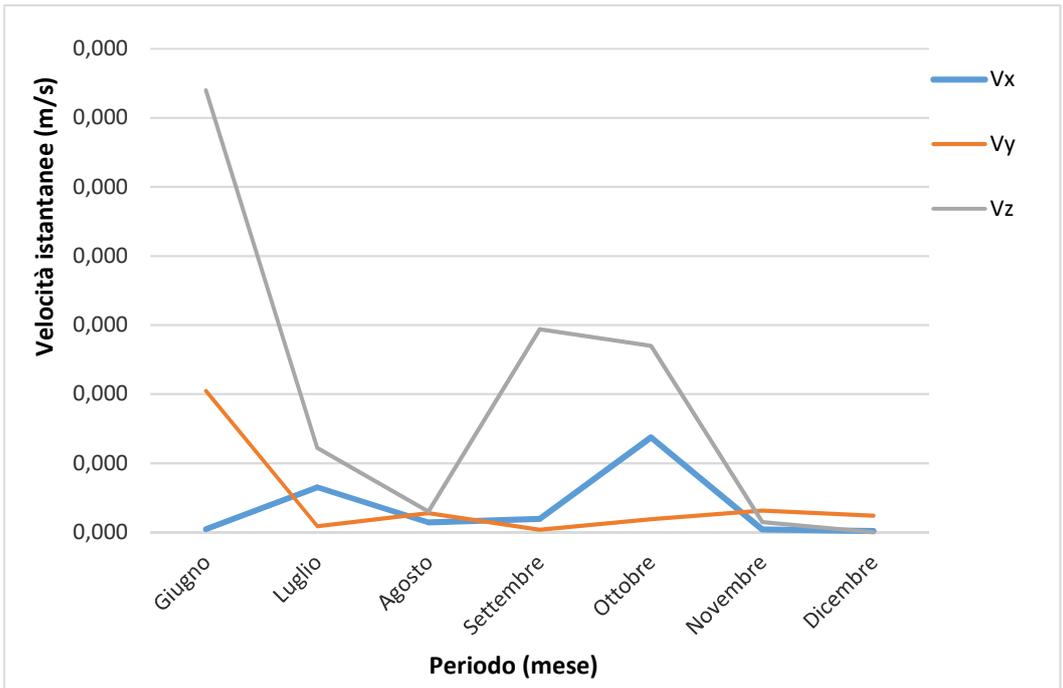


Figura 178 - Velocità istantanee minime per il prisma 4<sub>B</sub>

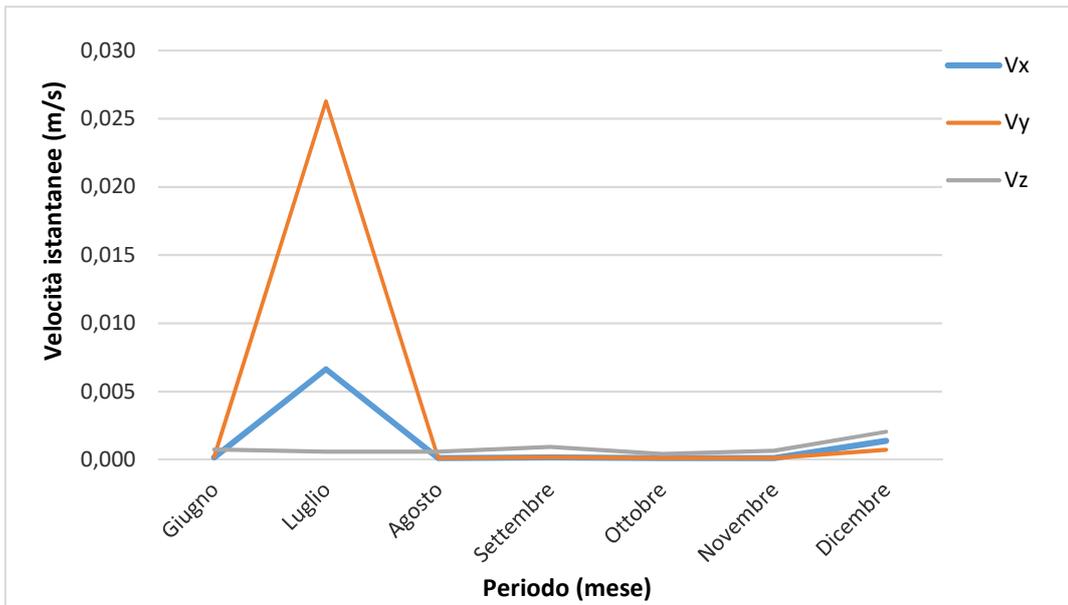


Figura 179 - Velocità istantanee massime per il prisma 4<sub>B</sub>

## 2 I risultati del calcolo per il prisma 8<sub>B</sub>

Nr. Prisma	Periodo (mese)	Spostamenti mensili cumulati(m)			Spostamenti mensili (m)		
		Dx	Dy	Dz	Dx	Dy	Dz
8 <sub>B</sub>	Giugno	0,022	0,014	0,013	0,022	0,014	0,013
	Luglio	0,023	0,072	0,010	0,001	0,058	0,003
	Agosto	0,042	0,108	0,004	0,019	0,037	0,006
	Settembre	0,030	0,123	0,013	0,012	0,015	0,009
	Ottobre	0,023	0,072	0,002	0,007	0,052	0,011
	Novembre	0,496	0,806	0,007	0,473	0,734	0,005
	Dicembre	0,794	1,233	0,008	0,299	0,427	0,002

Tabella 70 - Spostamenti mensili cumulati e mensili per il prisma 8<sub>B</sub>

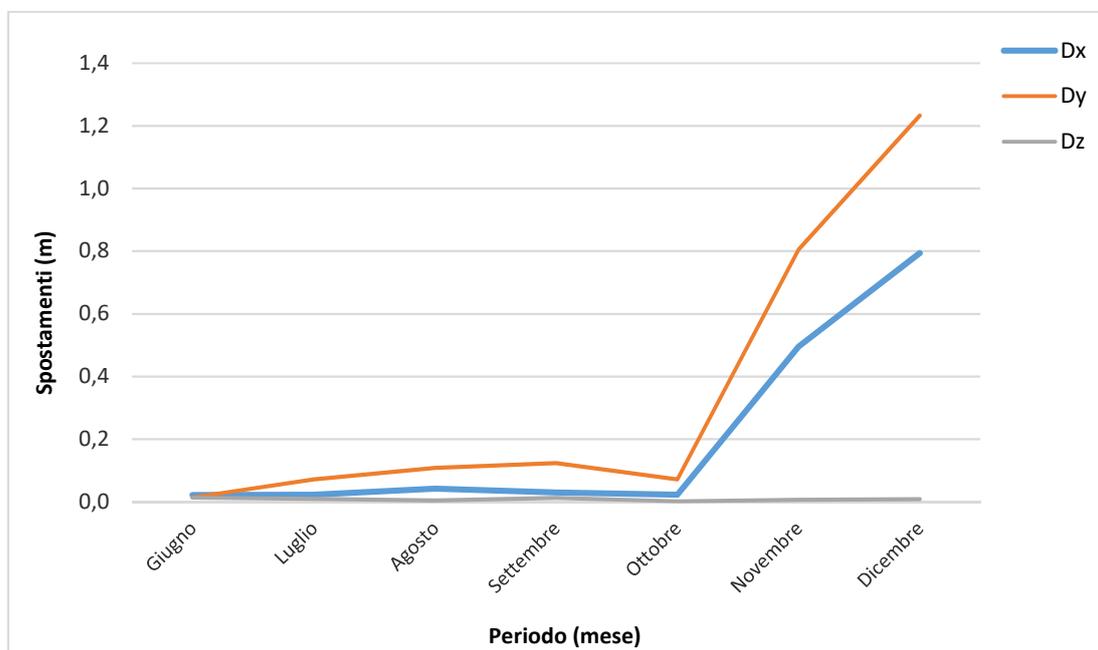


Figura 180 - Spostamenti mensili cumulati per il prisma 8<sub>B</sub>

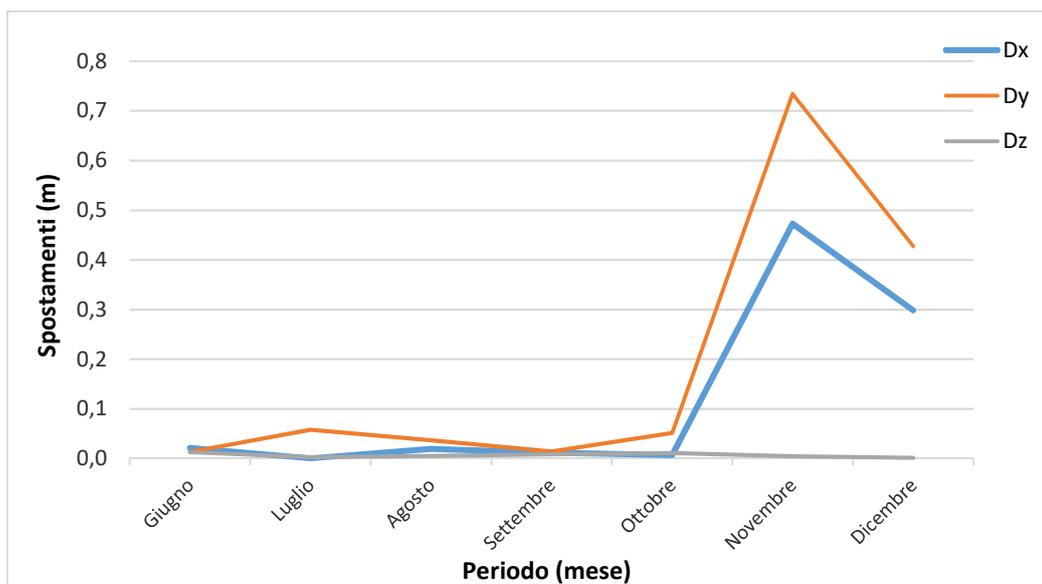


Figura 181 - Spostamenti mensili per il prisma 8<sub>B</sub>

Nr. Prisma	Periodo (mese)	Spostamenti giornalieri cumulati(m)			Spostamenti giornalieri (m)		
		Dx	Dy	Dz	Dx	Dy	Dz
8 <sub>B</sub>	Giugno	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
	Luglio	0,000	0,001	0,000	0,000	0,002	0,000
	Agosto	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000
	Settembre	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000
	Ottobre	0,000	0,001	0,000	0,000	0,002	0,000
	Novembre	0,003	0,005	0,000	0,016	0,024	0,000
	Dicembre	0,004	0,006	0,000	0,010	0,014	0,000

Tabella 71 - Spostamenti giornalieri cumulati e giornalieri per il prisma 8<sub>B</sub>

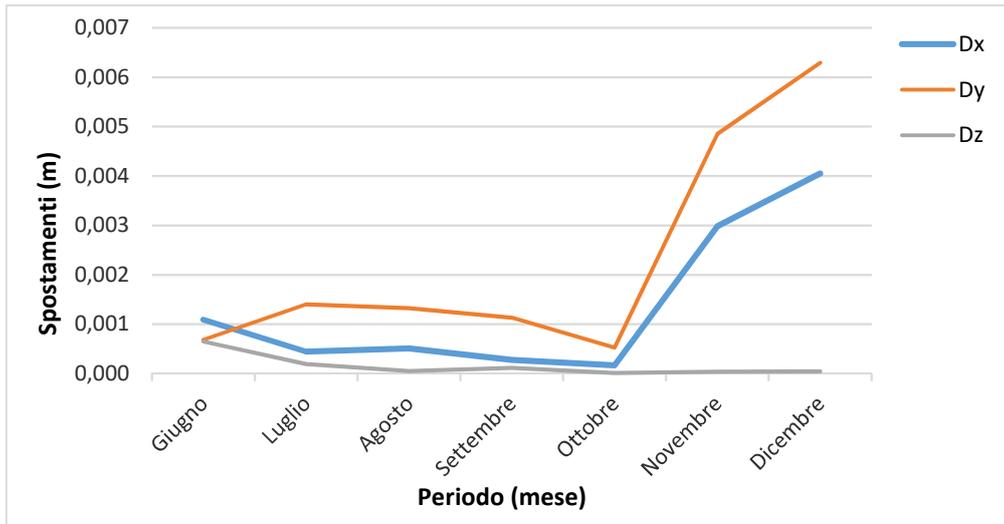


Figura 182 - Spostamenti giornalieri cumulati per il prisma 8<sub>B</sub>

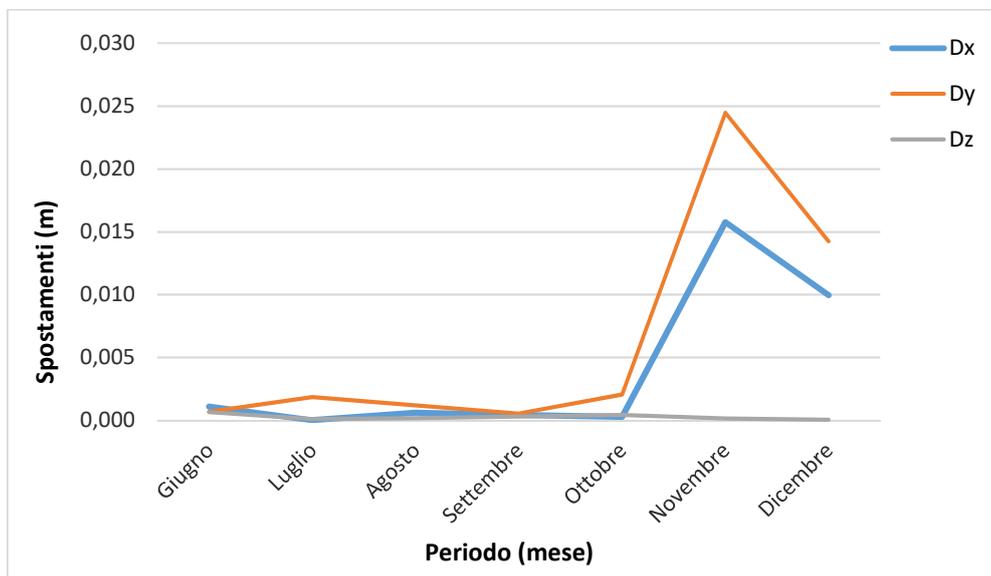


Figura 183 - Spostamenti giornalieri per il prisma 8<sub>B</sub>

Nr. Prisma	Periodo (mese)	Nr. giorni effettivi di misurazione	Velocità istantanee (m/s) minime			Velocità istantanee (m/s) massime		
			Vx	Vy	Vz	Vx	Vy	Vz
8 <sub>B</sub>	Giugno	20	3,09E-08	6,55E-08	3,20E-07	5,62E-05	9,32E-05	2,59E-04
	Luglio	31	1,26E-08	3,04E-07	6,11E-07	3,96E-03	2,14E-02	2,86E-04
	Agosto	31	2,01E-08	2,19E-08	3,13E-08	4,51E-05	5,49E-05	2,20E-04
	Settembre	27	1,34E-08	1,24E-08	2,18E-07	9,75E-05	1,00E-04	5,59E-04
	Ottobre	25	3,14E-09	6,05E-08	1,62E-07	1,23E-04	9,59E-05	3,61E-04
	Novembre	30	4,21E-08	1,73E-07	1,43E-07	1,44E-04	4,12E-04	1,67E-03
	Dicembre	30	4,52E-08	3,74E-08	1,28E-08	8,33E-02	6,82E-02	3,97E-02

Tabella 72 - Velocità istantanee minime e massime per il prisma 8<sub>B</sub>

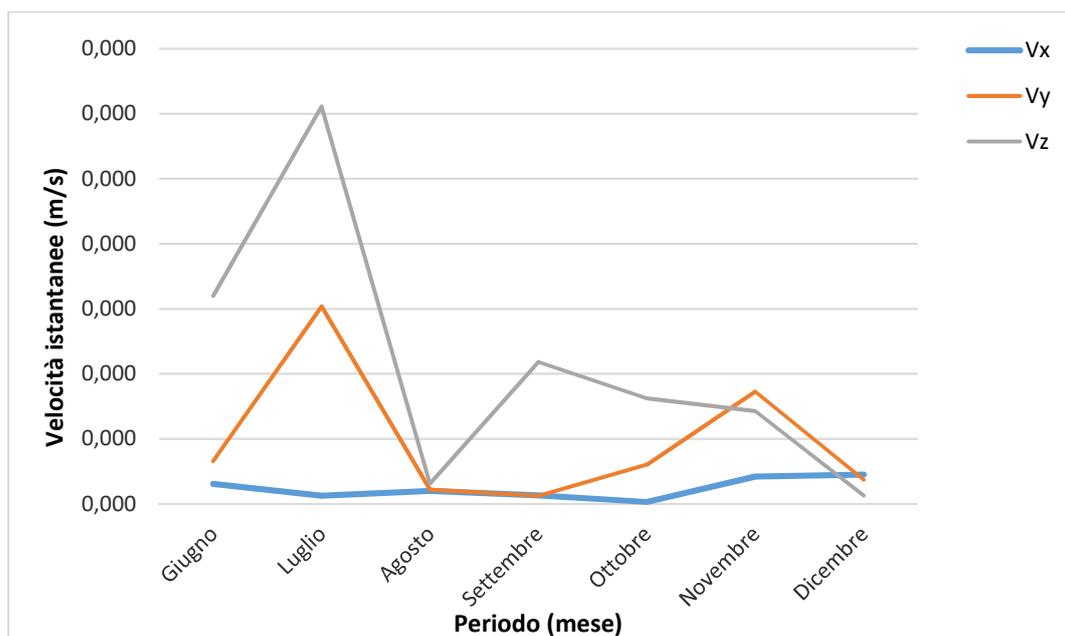


Figura 184 - Velocità istantanee minime per il prisma 8<sub>B</sub>

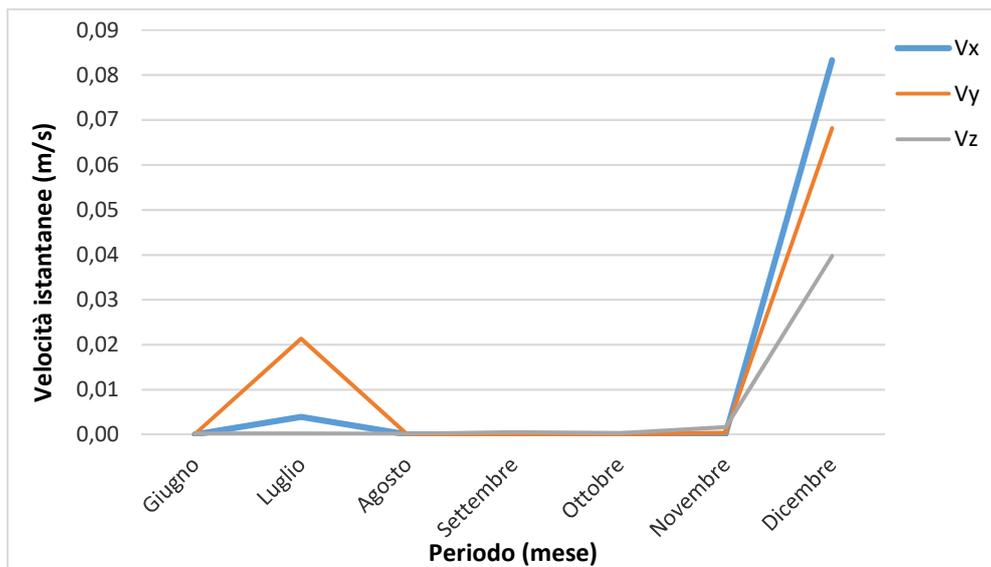


Figura 185 - Velocità istantanee massime per il prisma 8B

### 3 I risultati del calcolo per il prisma 13B

Nr. Prisma	Periodo (mese)	Spostamenti mensili cumulati(m)			Spostamenti mensili (m)		
		Dx	Dy	Dz	Dx	Dy	Dz
13B	Giugno	0,124	0,209	0,041	0,124	0,209	0,041
	Luglio	4,039	7,866	0,045	3,916	7,656	0,004
	Agosto	3,963	8,002	0,095	0,076	0,136	0,050
	Settembre	3,974	8,078	0,192	0,011	0,077	0,097
	Ottobre	4,098	8,400	0,125	0,124	0,321	0,068
	Novembre	4,044	8,519	0,138	0,054	0,120	0,013
	Dicembre	3,911	8,703	0,137	0,133	0,184	0,000

Tabella 73 - Spostamenti mensili cumulati e mensili per il prisma 13B

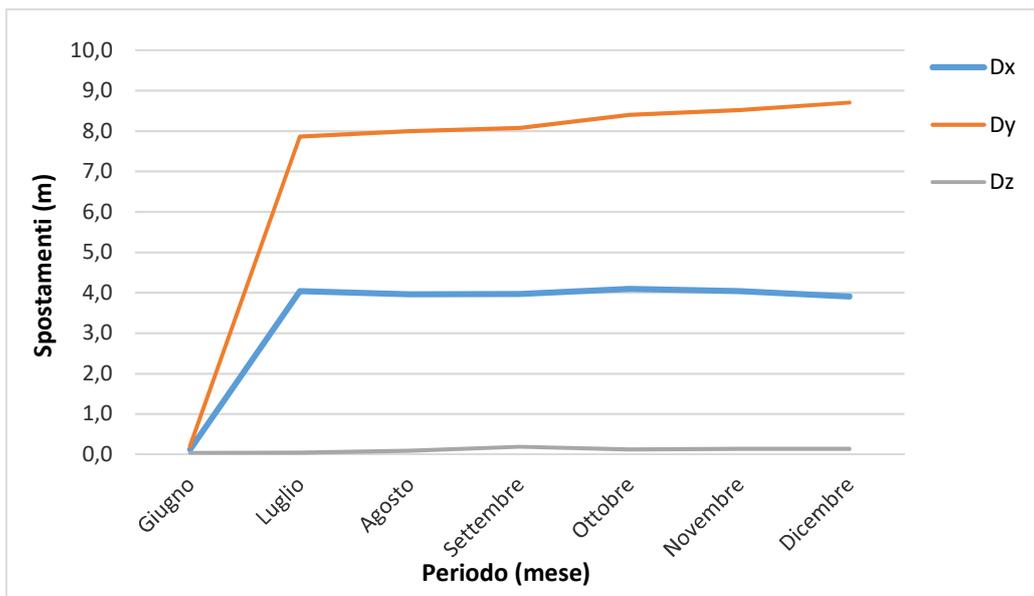


Figura 186 - Spostamenti mensili cumulati per il prisma 13<sub>B</sub>

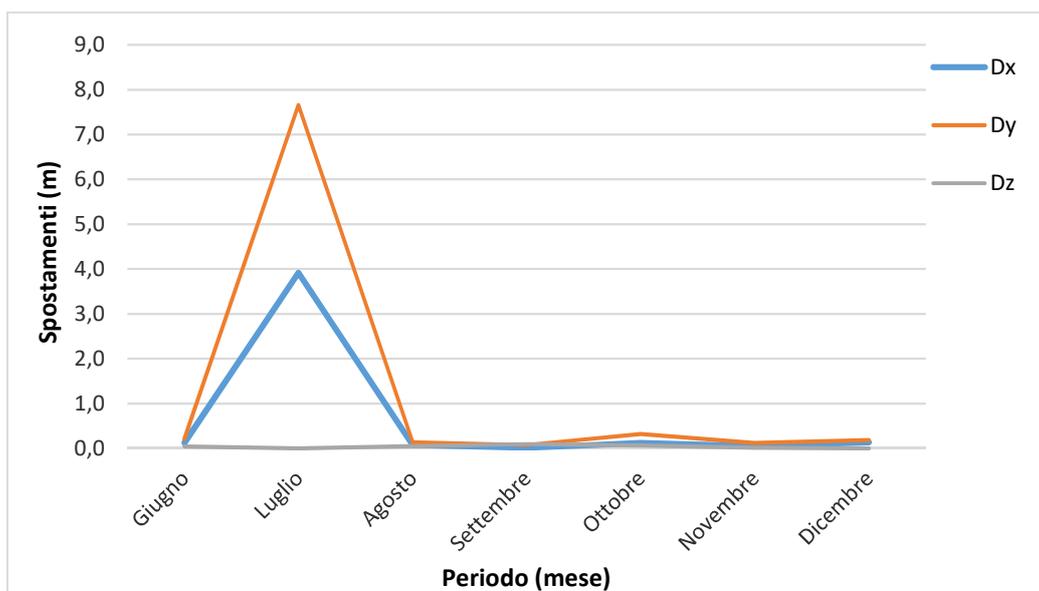


Figura 187 - Spostamenti mensili per il prisma 13<sub>B</sub>

Nr. Prisma	Periodo (mese)	Spostamenti giornalieri cumulati(m)			Spostamenti giornalieri (m)		
		Dx	Dy	Dz	Dx	Dy	Dz
13 <sub>B</sub>	Giugno	0,007	0,012	0,002	0,007	0,012	0,002
	Luglio	0,104	0,202	0,001	0,186	0,365	0,000
	Agosto	0,057	0,116	0,001	0,003	0,005	0,002
	Settembre	0,048	0,099	0,002	0,001	0,006	0,007
	Ottobre	0,039	0,081	0,001	0,006	0,015	0,003
	Novembre	0,032	0,067	0,001	0,002	0,005	0,001
	Dicembre	0,025	0,068	0,001	0,005	0,007	0,000

Tabella 74 - Spostamenti giornalieri cumulati e giornalieri per il prisma 13<sub>B</sub>

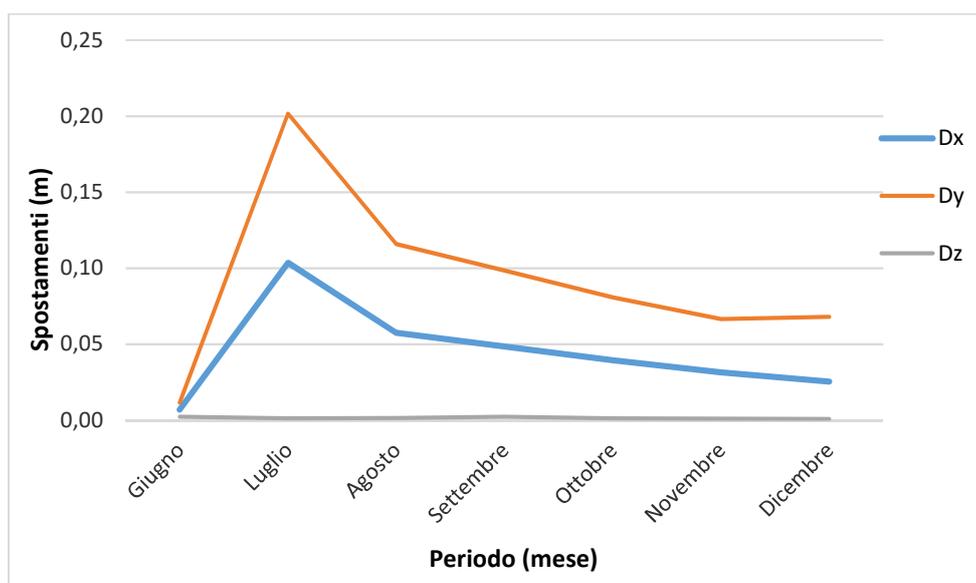


Figura 188 - Spostamenti giornalieri cumulati per il prisma 13<sub>B</sub>

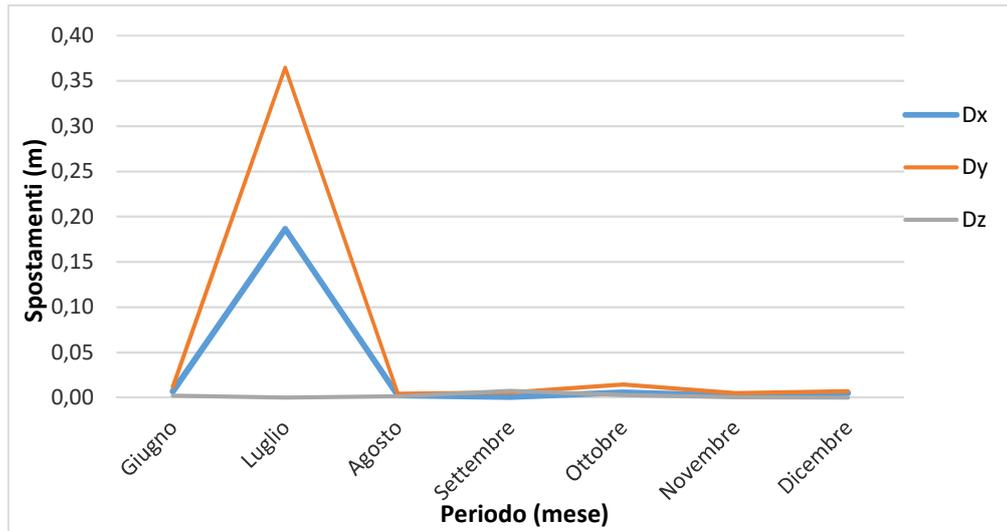


Figura 189 - Spostamenti giornalieri per il prisma 13<sub>B</sub>

Nr. Prisma	Periodo (mese)	Nr. giorni effettivi di misurazione	Velocità istantanee (m/s) minime			Velocità istantanee (m/s) massime		
			V <sub>x</sub>	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	V <sub>x</sub>	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>
13 <sub>B</sub>	Giugno	18	3,97E-07	6,65E-08	9,72E-08	5,57E-04	3,81E-04	1,62E-03
	Luglio	21	1,12E-07	1,64E-07	1,65E-07	1,96E-02	3,43E-02	1,16E-03
	Agosto	30	8,53E-08	3,16E-09	1,82E-07	2,49E-04	1,78E-04	1,96E-03
	Settembre	13	1,01E-06	5,33E-08	9,18E-07	2,55E-04	1,51E-04	1,04E-03
	Ottobre	22	5,12E-07	2,74E-08	1,49E-06	4,01E-04	1,99E-04	8,98E-04
	Novembre	24	8,49E-08	2,29E-07	5,50E-08	7,97E-04	4,57E-04	1,77E-03
	Dicembre	26	2,76E-07	2,94E-07	2,20E-07	2,70E-04	1,98E-04	1,28E-03

Tabella 75 - Velocità istantanee minime e massime per il prisma 13<sub>B</sub>

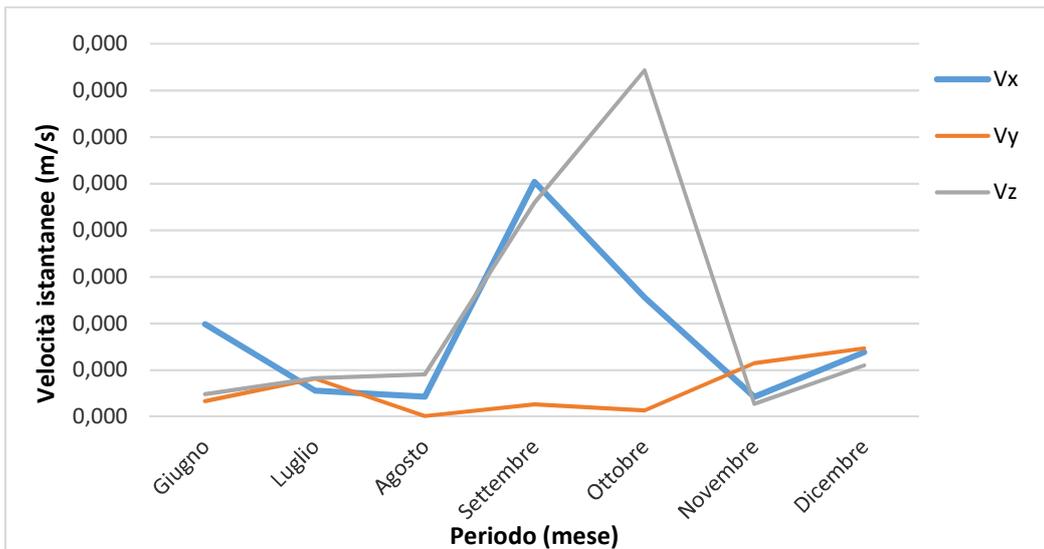


Figura 190 - Velocità istantanee minime per il prisma 13<sub>B</sub>

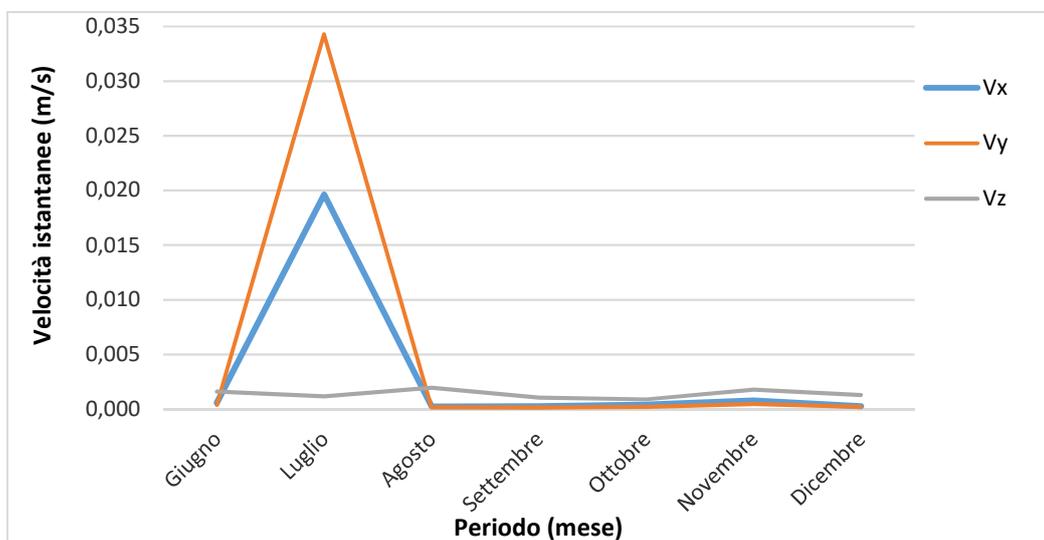


Figura 191 - Velocità istantanee massime per il prisma 13<sub>B</sub>

## Bibliografia e sitografia

- [1] [www.isprambiente.gov.it](http://www.isprambiente.gov.it), «Rapporto sulle frane,» 2018. [Online]. [Consultato: settembre 2018].
- [2] «IFFI - Inventario dei fenomeni franosi in Italia,» [Online]. Available: <http://www.isprambiente.gov.it>. [Consultato: ottobre 2018].
- [3] [Online]. Available: <http://www.engeology.eu>. [Consultato: marzo 2019].
- [4] [unifi.it](http://www.unifi.it), «[www.geotecnica.dicea.unifi.it/disp\\_18.pdf](http://www.geotecnica.dicea.unifi.it/disp_18.pdf),» 2018. [Online]. Available: <http://www.unifi.it>. [Consultato: ottobre 2018].
- [5] «Fenomeni di dissesto geologico,» 2006. [Online]. Available: <http://www.isprambiente.gov.it>. [Consultato: novembre 2018].
- [6] G. e. al., "Valutazione delle condizioni di stabilità dell'abitato di Succiso (provincia di Reggio Emilia), Bologna, 2011.
- [7] «Capitolo 13 - Le frane,» [Online]. Available: <http://freedom.dicea.unifi.it>. [Consultato: febbraio 2019].
- [8] «Report monitoraggio IRPI,» 1 maggio 2005. [Online]. Available: <http://irpi.cnr.it>. [Consultato: dicembre 2018].
- [9] «Monitoraggio-geotecnico,» 5 maggio 2005. [Online]. Available: <http://www.polimi.it>. [Consultato: dicembre 2018].
- [10] [Online]. Available: <http://www.gestecno.it>. [Consultato: marzo 2019].
- [11] «Introduzione al SAR,» [Online]. Available: <http://www.polimi.it>. [Consultato: marzo 2019].
- [12] [Online]. Available: <http://www.esa.int>. [Consultato: febbraio 2019].
- [13] [Online]. Available: <http://www.eledia.org/showcase/tell-me>. [Consultato: dicembre 2018].
- [14] [Online]. Available: <http://researchgate.net>. [Consultato: gennaio 2019].

- [15] «Introduzione - Appunti di Fotogrammetria,» [Online]. Available: <http://imagelab.ing.unimore.it/files2/Calibrazione.pdf> . [Consultato: 26 marzo 2019].
- [16] P. M. e. al, *Fotogrammetria*, P. M. e. al, A cura di, Torino, 2015, pp. 28-88.
- [17] 2016. [Online]. Available: <http://www.arpae.it>. [Consultato: dicembre 2018].
- [18] A. Cina, Dal GPS al GNSS (Global Navigation Satellite System) per la geomatica, Torino: Celid, 2014, pp. 11-28; 48-225.
- [19] «sistemi-globali-di-navigazione-satellitare-,» [Online]. Available: <https://www.strumentazioneelettronica.it>. [Consultato: marzo 2019].
- [20] [Online]. Available: <http://www.NATGEO.it>. [Consultato: dicembre 2018].
- [21] B. L.. [Online]. Available: <http://www.polimi.it/seminario20040519.pdf>. [Consultato: febbraio 2019].
- [22] [Online]. Available: <http://www.qzss.go.jp>. [Consultato: febbraio 2019].
- [23] «Il servizio di posizionamento con le Reti GNSS,» 1 giugno 2009. [Online]. Available: <http://www.labtopo.ing.inipg.it>. [Consultato: dicembre 2018].
- [24] «Servizio di posizionamento Interregionale GNSS Piemonte-Lombardia,» [Online]. Available: <http://www.sistemapiemonte.it>. [Consultato: dicembre 2018].
- [25] «SPIN -Servizio di Posizionamento Interegionale GPS/GNSS di Regione Piemonte e Regione Lombardia,» [Online]. Available: <http://www.spingnss.it>. [Consultato: dicembre 2018].
- [26] G. e. al, *Geomorphology*, 2013, pp. 61-79.
- [27] G. e. al, «Landslides and infrastructures: The case of the Montaguto earth flow in southern Italy,» Benevento, 2013.
- [28] L. e. al, «Engineering Geology,» 2014.
- [29] [Online]. Available: <http://www.cartesiostrumenti.it>. [Consultato: marzo 2019].