UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

TESI DI LAUREA

Tecniche e strategie di elaborazione delle acquisizioni a lunga permanenza eseguite nella rete statica PoDelNet-IGM95 con metodologie GNSS nell'area deltizia del Po

Relatore: **Chiar.mo PROF. ANDREA MENIN**

Laureando: **LUCA PESENATO**

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

INDICE

INTRODUZIONE 4

1. IL DELTA DEL PO 5

1.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO 5

1.2 PROBLEMATICHE 6

1.3 LA SUBSIDENZA 6

2. METODOLOGIE DI RILIEVO GNSS 7

2.1 INTRODUZIONE E CENNI STORICI DEI SISTEMI GPS e GNSS 7

2.2 ULTERIORI SISTEMI DI POSIZIONAMENTO 8

2.3 STRUTTURA DEL GPS 9

2.3.1 SEGMENTO SPAZIALE 9

2.3.2 SEGMENTO DI CONTROLLO 10

2.3.3 SEGMENTO UTENTE 12

2.4 SEGNALE GPS 13

2.5 MODALITA' DI MISURA CON IL SISTEMA GPS 14

2.5.1 METODO DELLA PSEUDODISTANZA 14

2.5.2 METODO DELL'OSSERVABILE FASE 16

2.6 ERRORI DEL GPS 17

2.7 TECNICHE DIFFERENZIALI 19

2.8 SISTEMI DI RIFERIMENTO DEL GPS 21

2.9 METODI DI RILIEVO GNSS 25

3. RETE GEODETICA PODELNET 25

3.1 PROGETTAZIONE DELLA RETE 25

3.2 PROGETTO ED ESECUZIONE DELLA CAMPAGNA DI MISURA 32

3.3 PREDISPOSIZIONE DEI DATI ACQUISITI PER IL PROCESSAMENTO 42

3.4 ELABORAZIONE DEI DATI ACQUISITI: CALCOLO DELLE BASELINE..... 44

3.5 COMPENSAZIONE DELLA RETE: DETERMINAZIONE DELLE COORDINATE FINALI 50

3.5.1 COMPENSAZIONE INTRINSECA O DEI MINIMI VINCOLI 50

3.5.2 COMPENSAZIONE VINCOLATA..... 55

3.6 VALIDAZIONE DELLA CAMPAGNA DI MISURA 60

4. CONCLUSIONI 601

BIBLIOGRAFIA..... 63

SITOGRAFIA 64

INTRODUZIONE

Lo scopo di questo elaborato è lo studio delle metodologie di misura e delle strategie di elaborazione dei dati acquisiti relativi ad una rete geodetica di riferimento, denominata PODELNET (PO DELta NETwork), nell'area del delta del fiume Po.

Questa rete viene rilevata con cadenza biennale dal Laboratorio di Rilevamento e Geomatica del Dipartimento di Ingegneria Civile Edile ed Ambientale dell'Università di Padova, attraverso metodologia satellitare GNSS. Nello specifico, verranno presi in considerazione i dati relativi alla campagna di misura dell'anno 2022.

Dopo una prima parte descrittiva dell'area oggetto di studio, si passa all'analisi delle metodologie satellitari GNSS (Global Navigation Satellite System) utilizzate per la misura della rete PODELNET. I dati acquisiti dai ricevitori satellitari, con stazionamenti a lunga permanenza, una volta terminata la campagna di misura vengono analizzati, controllati e implementati in un ambiente di calcolo per la loro elaborazione (viene utilizzato il software commerciale Infinity della casa costruttrice Leica). L'elaborazione della rete è costituita da una prima fase che ha come obiettivo il calcolo delle baseline, ovvero dei vettori 3D che costituiscono i collegamenti a rete tra i vertici. Successivamente viene eseguita la compensazione della rete che permette di determinare le coordinate finali dei vertici con le relative precisioni, mediante le quali si andrà eventualmente a validare la campagna di misura.

1. IL DELTA DEL PO

1.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

Il Po, il maggiore fiume italiano che sfocia nel Mar Adriatico con il suo articolato delta, nasce oltre seicentocinquanta chilometri più a monte, nelle Alpi Occidentali, ai piedi del Monviso. Il corso di questo grande fiume ha modificato nei millenni la morfologia del territorio che attraversa, mutandone continuamente l'aspetto per la dimensione quantitativa dei detriti trasportati e per la forza impressa sul letto del fiume dall'apporto di acqua dei diversi affluenti. La sua lunghezza lo rende il fiume più lungo interamente compreso nel territorio italiano, quello con il bacino idrografico più esteso (circa 71.000 km²) e anche quello con la massima portata alla foce, sia essa minima (assoluta 270 m³/s), media (1.540 m³/s) o massima (13.000 m³/s). Il delta del Po ricopre una superficie di circa 400 km^2 che si protrae nel mare per quasi 25 km. Le diramazioni deltizie attive, da settentrione a meridione, sono: il Po di Maistra, il Po della Pila (che sfocia in mare attraverso tre distinte bocche: Busa di Tramontana, Busa Dritta e Busa di Scirocco), il Po delle Tolle (con le diramazioni di Busa Bastimento e Bocca del Po delle Tolle), il Po di Gnocca e il Po di Goro. Questi cinque rami principali danno origine a sette lagune, quali Caleri, Marinetta, Basso, Barbamarco, Canarin, Scardovari e Goro [3] (Fig.1).

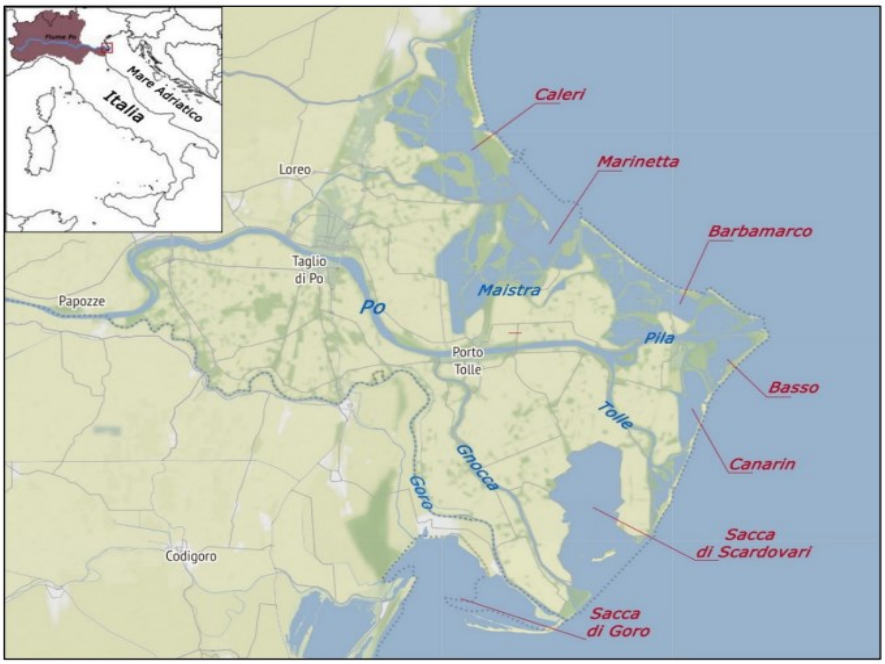


Figura 1: Mappa delta del Po

1.2 PROBLEMATICHE

Il Delta del Po, come altre foci a delta, ha subito numerose modifiche nel corso dei secoli da fattori naturali e, in particolare, dalle attività antropiche. Tra queste si possono ricordare gli interventi idraulici realizzati dall'uomo per salvaguardare il territorio deltizio a partire dal 1100 e, in particolare, si può citare il "Taglio di Porto Viro". In tale occasione, tra il 1600 e il 1604, i tecnici veneziani, temendo che i sedimenti fluviali scaricati in mare potessero chiudere la laguna veneta, deviarono il Po a sud-est in modo tale da scaricare l'acqua nella Sacca di Goro. Tale opera portò al progressivo sviluppo dell'attuale sistema deltizio.

Altri fattori responsabili dell'erosione del delta e del suo graduale affondamento sono le attività di bonifica del territorio, di costruzione di argini per la protezione dalle inondazioni e di estrazione di acque metanifere dal suolo. Inoltre, un ruolo fondamentale nel cambiamento di questo tipo di aree appartiene al fenomeno dell'eustatismo, ovvero l'innalzamento del livello medio marino, che, combinato con i problemi relativi alla subsidenza, ovvero all'abbassamento del suolo, sta recando molti danni. Proprio per l'instabilità della zona presa in esame si è deciso di realizzare degli studi che permettano di monitorare e analizzare le variazioni altimetriche cui essa è soggetta.

1.3 LA SUBSIDENZA

Nel corso dei secoli, l'area del Delta del Po si è resa protagonista di numerosi cambiamenti dovuti principalmente al fenomeno della subsidenza, ovvero un qualsiasi movimento di abbassamento verticale della superficie terrestre. Quest'ultimo generalmente deriva da eventi naturali, ma si è dimostrato che può essere incrementato e a volte innescato direttamente dalle attività dell'uomo. Risulta pertanto essere indipendente dalla causa che lo ha prodotto, dallo sviluppo areale, dall'evoluzione temporale del fenomeno, dalla velocità di spostamento del terreno e dalle alterazioni ambientali che ne conseguono. Le principali cause naturali possono essere i processi tettonici, i movimenti isostatici e le trasformazioni chimico-fisiche (diagenesi) dei sedimenti per effetto del carico litostatico o dell'oscillazione del livello di falda. D'altra parte, la subsidenza indotta dall'uomo si esplica generalmente in tempi relativamente brevi con effetti che possono compromettere fortemente opere ed attività umane, nel caso

in cui non si intervenga preventivamente con azioni di controllo e gestione. Le cause più diffuse sono essenzialmente lo sfruttamento eccessivo delle falde acquifere, l'estrazione di idrocarburi e le bonifiche idrauliche [(1)]. A compromettere ulteriormente l'area del Delta del Po si aggiunge anche il fenomeno dell'eustatismo, vale a dire l'innalzamento o l'abbassamento del livello medio dei mari, dovuto principalmente alle glaciazioni e ai disgeli che comportano forti variazioni del volume dell'acqua [(2)].

Al fine di monitorare continuamente le variazioni altimetriche che coinvolgono quest'area e raffittire la rete nazionale IGM95, si è deciso di creare una rete geodetica, denominata PODELNET, misurata mediante l'utilizzo di metodologie di rilevamento satellitare GNSS (Global Navigation Satellite System).

2. METODOLOGIE DI RILIEVO GNSS

2.1 INTRODUZIONE E CENNI STORICI DEI SISTEMI GPS e GNSS

Il sistema satellitare globale di navigazione (in inglese, Global Navigation Satellite System, acronimo GNSS) è un sistema di geo-radiolocalizzazione e navigazione terrestre, che utilizza una rete di satelliti artificiali in orbita e di pseudoliti, ovvero di trasmettitori che consentono l'evoluzione terrestre dei servizi GPS, essendo installati prevalentemente in modo stabile a terra. Nel caso in esame, il sistema GNSS è impiegato per rilevare e monitorare nel tempo le deformazioni verticali del suolo determinando così le variazioni altimetriche dell'area deltizia. Ad oggi, è inevitabile parlare di GNSS in quanto sono attive diverse costellazioni satellitari come Glonass, varato dalla Russia, Galileo, di proprietà dell'Europa, Beidou, sviluppato in Cina e GPS progettato dal Dipartimento di Difesa Statunitense (USDOD). Quest'ultimo, noto con l'acronimo GPS (Global Positioning System), è stato progettato a partire dagli anni '70 per motivi strettamente militari permettendo ai mezzi la possibilità di orientarsi nello spazio. Nel 1994 fu reso disponibile anche per l'uso civile, nonostante tale segnale fosse intenzionalmente degradato attraverso la Selective Availability (SA) che introduceva errori intenzionali nei segnali satellitari allo scopo di ridurre l'accuratezza della rilevazione, consentendo precisioni dell'ordine di 900–950 m. Questa degradazione del segnale è stata disabilitata nel mese di maggio 2000 grazie a un decreto del presidente degli Stati Uniti Bill Clinton, mettendo così a disposizione degli usi civili la precisione attuale di circa 10–20 m [(4)].

Il GPS è un sistema per posizionamento geo-spaziale a copertura globale che fornisce la posizione di un osservatore a terra in tempo reale, in qualsiasi condizione atmosferica ed in maniera continua in ogni parte del globo. Il principio di funzionamento è basato sulla ricezione di segnali provenienti dai satelliti artificiali in orbita attorno alla terra ad una distanza di circa 20.200 km dalla superficie terrestre. Tali segnali contengono le informazioni per calcolare la posizione del satellite nello spazio e la distanza tra quest'ultimo e il ricevitore a terra, con precisioni che possono variare dal centimetro al centinaio di metri a seconda dello scopo e del tipo di ricevitore utilizzato.

2.2 ULTERIORI SISTEMI DI POSIZIONAMENTO

Come anticipato nel capitolo precedente, oltre al GPS sono in uso, o in fase di sviluppo, altri sistemi globali di posizionamento. Il Glonass (Global'naya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) è stato realizzato al tempo dell'ex Unione Sovietica nel corso dei primi anni '80 e l'utilizzo originale di tale rete era quello di fungere da supporto al sistema guida e al posizionamento dei missili balistici. Ad oggi, il sistema Glonass è costituito da 24 satelliti attivi, di cui uno in manutenzione e tre di riserva, orbitanti su tre piani inclinati di 65º rispetto all'equatore a una quota di 19.000 km dalla terra. Il sistema viene attualmente utilizzato sia per scopi civili che per obiettivi militari. La stazione master che gestisce il sistema si trova a Mosca [(5)].

Un ulteriore sistema di posizionamento è il Beidou, sviluppato dalla Repubblica popolare cinese, nato inizialmente per una copertura regionale e successivamente implementato per una copertura globale. Nato per uso militare, recentemente è stata annunciata l'apertura a uso commerciale. Tale rete è composta da 35 satelliti di cui 5 geostazionari, ovvero situati su un'orbita equatoriale a una precisa quota, grazie alla quale possono completare la propria orbita con un periodo pari a quello corrispondente alla rotazione terrestre e, quindi, occupare sempre lo stesso punto sopra il globo, e 30 non geostazionari.

Infine, l'Unione Europea ha progettato il sistema Galileo, entrato in servizio il 15 dicembre 2016. Tale rete è costituita da 30 satelliti, di cui 27 operativi e tre di riserva, orbitanti su tre piani inclinati di circa 56º rispetto all'equatore e posti ad una distanza di 23.222 km dal globo.

2.3 STRUTTURA DEL GPS

Il sistema GPS è costituito essenzialmente da tre segmenti (Fig.2), ognuno con caratteristiche e scopi differenti, ma correlati tra loro:

- Segmento spaziale
- Segmento di controllo
- Segmento utente

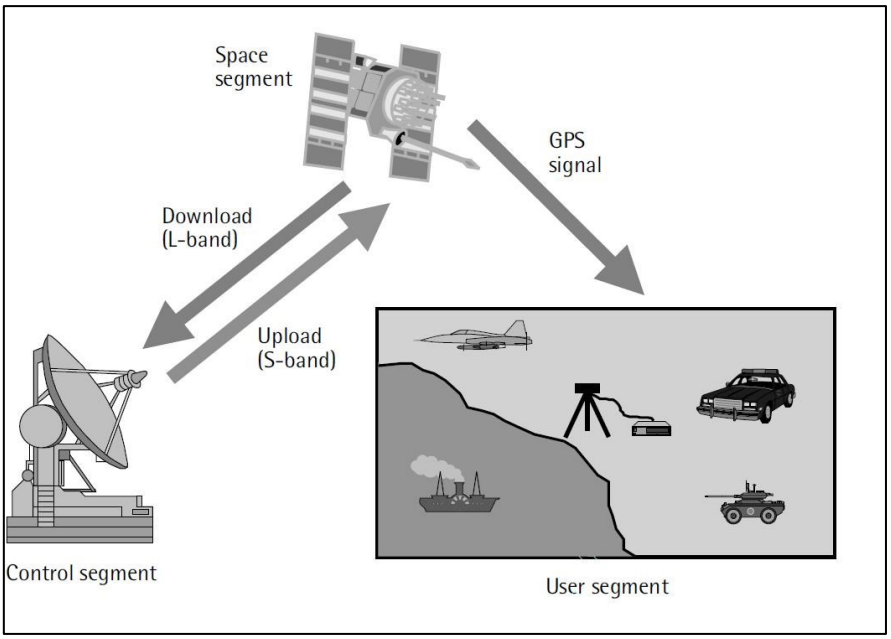


Figura 2: Segmenti GPS

2.3.1 SEGMENTO SPAZIALE

Il segmento spaziale (Fig.3) si definisce, in generale, come la costellazione GPS costituita da 32 satelliti distribuiti su sei piani orbitali, spaziati tra loro di 60º e inclinati di 55º rispetto all'equatore e ad una quota di circa 20.200 km dalla superficie terrestre. I satelliti attivi sono 24 e da qualsiasi punto della terra ed in qualsiasi momento se ne possono osservare da un minimo di quattro a un massimo di dieci contemporaneamente. I satelliti hanno una velocità di 3.9 km al secondo e un periodo nominale di 12 h di tempo siderale (11h 58m 2s). Ogni satellite è costituito essenzialmente da oscillatori atomici molto stabili, in grado di calcolare la variazione tra l'orario di partenza e di ricezione del segnale, in modo tale da determinare la distanza satellite-ricevitore. Inoltre, è presente un apparato

di ricezione, uno di trasmissione, un'unità di calcolo (memorie) per le registrazioni delle informazioni, un apparato di autoalimentazione (7 mq di pannelli solari) e infine un apparato di navigazione pilotabile da terra nel caso di una correzione di orbita.

Per quanto riguarda le funzioni dei satelliti, quest'ultimi sono in grado di trasmettere informazioni agli utilizzatori mediante un segnale radio, di mantenere un riferimento di tempo accurato, di ricevere e memorizzare informazioni dal segmento di controllo, e di eseguire manovre e correzioni d'orbita.

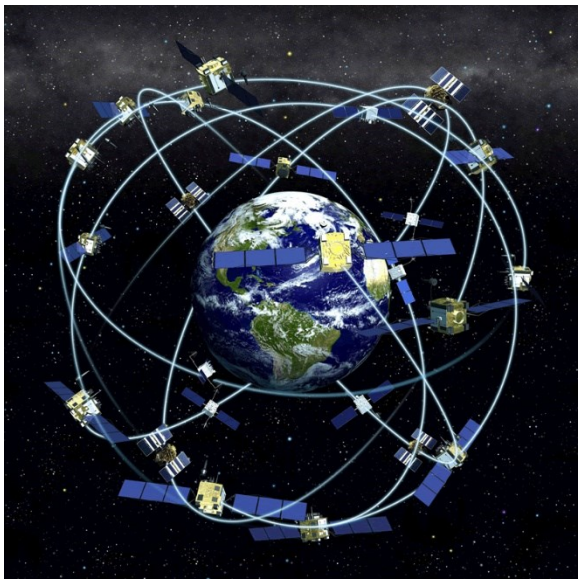


Figura 3: Segmento spaziale GPS

2.3.2 SEGMENTO DI CONTROLLO

Il segmento di controllo (Fig.4) è costituito da 5 stazioni a terra, quasi equidistanti tra loro, lungo la linea equatoriale, la cui posizione è nota con grande precisione. Le cinque stazioni sono così dislocate: Hawaii (USA), Colorado Springs (USA), Ascension (Oceano Atlantico meridionale), Diego Garcia (Oceano Indiano), Kwajalein (Oceano Pacifico Settentrionale). Quest'ultime sono stazioni di monitoraggio, le quali ricevono continuamente i segnali emessi da tutti i satelliti per controllare le loro effemeridi (dati descrittivi sulla posizione dei satelliti) e predire la loro orbita. I dati raccolti da ciascuna stazione vengono inviati alla stazione Master (Colorado Springs) che effettua una stima quotidiana dell'orbita e dell'offset d'orologio previsti per ciascun satellite nelle 24 ore successive;

le orbite previste vengono parametrizzate, quindi i dati vengono inviati al satellite, il quale li comunicherà agli utenti durante la giornata successiva. Ci si riferisce a tali informazioni con il termine di Broadcast Ephemerides (Effemeridi Trasmesse). Esse, pur essendo comunicate dai satelliti in tempo reale, sono frutto di previsioni effettuate dalla rete di controllo 24 ore prima. Una possibile alternativa alle effemeridi trasmesse sono le Precise Ephemerides (Effemeridi Precise) le quali, circa 4-8 settimane dopo la raccolta dei dati da parte delle stazioni di controllo, il Naval Surface Weapon Center (NSWC), in collaborazione con il Defence Mapping Agency (DMA), calcolano le effemeridi precise ottenute considerando i dati raccolti in 8 giorni da 10 stazioni sparse sul globo (le 5 stazioni di controllo più altre in Australia, Ecuador, Inghilterra, Argentina e Bahrein). Questi dati vengono inseriti in un programma di calcolo d'orbita che esegue una compensazione ai minimi quadrati fornendo un'orbita stimata e non estrapolata, come nel caso delle effemeridi trasmesse. Le stime delle orbite e degli offset degli orologi, effettuate dalla rete di controllo e quindi comunicate dai satelliti agli utenti mediante i messaggi di navigazione, sono affette da errori rispettivamente di circa 3 m e di circa 10 ns (che moltiplicato per c, equivale a circa 3 m di errore nella stima di distanza fra satellite e ricevitore) [6].

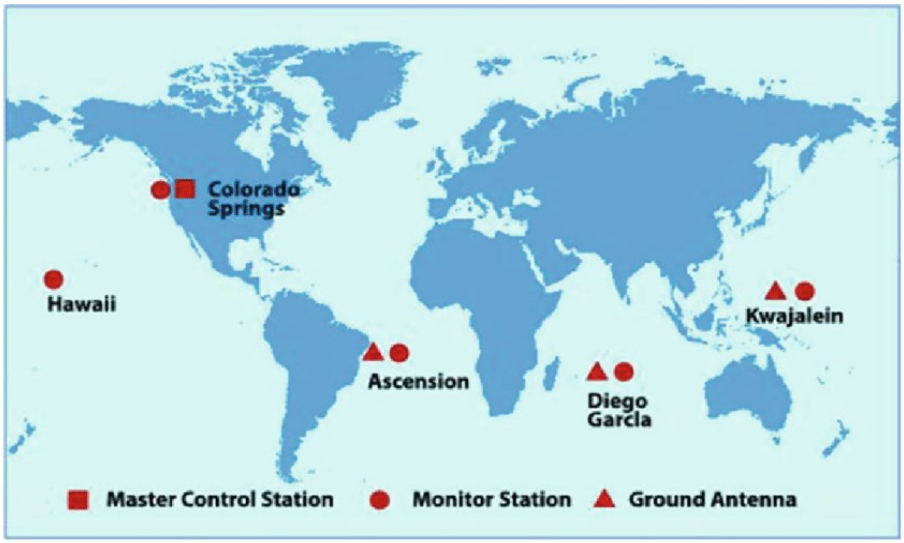


Figura 4: Segmento di controllo GPS

2.3.3 SEGMENTO UTENTE

Il segmento utente è costituito da tutti gli utenti che, equipaggiati di un ricevitore GPS, possono ricevere i segnali provenienti dai satelliti per ottenere il posizionamento tridimensionale in tempo reale o differito tramite postelaborazione. Per svolgere le sue funzioni, un ricevitore GPS è costituito da: antenna con un pre-amplificatore, sezione radiofrequenza, microprocessore, schermo di controllo (opzionale), sistema di registrazione dati e sistema di alimentazione. Esistono diversi modelli di ricevitori GPS, con potenzialità differenti l'uno dall'altro, che dipendono fondamentalmente dal tipo di analisi che essi possono effettuare sulle varie componenti del segnale ricevuto. Ogni ricevitore permette di recepire le informazioni inviate dal satellite, decodificando il codice C/A, e di determinare il tempo relativo grazie al codice P, dove C/A e P sono i due codici pseudocasuali attraverso cui è trasmesso il segnale GPS. In seguito, il ricevitore confronta i codici derivanti dal satellite con quelli da esso generati, modificandoli fino a ottenere la coincidenza tra di essi e assicurandosi che le frequenze di codice rimangano uguali nel tempo. Il tempo di ritardo tra le due sequenze, causato dal tempo impiegato dal segnale per giungere a Terra, moltiplicato per la velocità della luce, permette di ricavare la distanza satellite-ricevitore. Tale intervallo, però, è soggetto all'errore di non perfetta sincronizzazione tra l'orologio del satellite e quello del ricevitore e, per questo motivo, prende il nome di pseudodistanza. Risulta inoltre possibile calcolare l'osservabile fase, ovvero la differenza di fase tra il segnale inviato dal satellite e quello generato dal ricevitore posto a terra, che può mutare al variare del tempo a causa del moto relativo di questi due oggetti. Questo secondo osservabile viene determinato moltiplicando il segnale proveniente dal satellite per sé stesso, quindi demodulandolo, e sottraendolo alla replica generata nel ricevitore, a sua volta moltiplicato per sé stesso. Facendo così, si possono capire gli effetti ritardanti causati dal transito del segnale attraverso la ionosfera. Il posizionamento ottenuto con misure satellitari, vista la struttura di un ricevitore, è relativo al centro di fase dell'antenna ricevente; la sua individuazione è determinata in modo più o meno preciso a seconda del modello utilizzato.

Figura 5: Ricevitore GPS

2.4 SEGNALE GPS

Ogni satellite trasmette un segnale costituito da diverse componenti ma generate tutte dalla stessa frequenza fondamentale f_0 (f_0=10.23 Mhz), tipica dell'oscillatore di bordo del satellite. Le componenti del segnale sono [6]:

- Portanti (Carrier), L1 e L2: sono due onde con frequenza rispettivamente di 154 e 120 volte f_0 e lunghezze d'onda di 19.05 e 24.45 cm. I vantaggi nell'uso della doppia frequenza derivano dal fatto che l'effetto ionosferico sulla propagazione del segnale può essere quantificato essendo la ionosfera un mezzo dispersivo (che presenta un effetto diverso in funzione della frequenza del segnale).
- Codici, C/A, P e W: sono codici pseudorandom, cioè sequenze di stati +1 e -1 casuali che si ripetono dopo un certo intervallo di tempo. Nel codice C/A (Coarse/Acquisition o Clear/Access) la sequenza è emessa ad una frequenza pari allo $0.1f_0$ e si ripete ad intervalli di 10^{-3} s; ad ogni satellite è assegnato un codice C/A per poterlo identificare. Il codice P (Precision o Protected) si ripete ogni settimana ed è un segnale maggiormente accurato.

Inoltre, è prevista la possibilità di criptare il codice P con un codice W noto solo agli utenti abilitati ed emesso ad una frequenza pari a $0.2f_0$. La somma dei codici P e W fornisce il codice Y. Tale operazione di criptaggio viene definita A-S (AntiSpoofing). Il codice C/A è modulato solo sulla L1 mente il codice P viene modulato su entrambi le portanti L1 e L2. Risulta evidente che gli strumenti in grado di rilevare il codice P potranno avere prestazioni maggiori.

- Messaggio D: attraverso questo messaggio si informa l'utente dello stato di salute del satellite, dell'orologio e soprattutto dell'orbita, attraverso le effemeridi del satellite.

Componenti	**Frequenza (MHz)**
Frequenza fondamentale	$f_0 = 10.23$
Portante L1	$154f_0 = 1575.42$ (λ=19 cm)
Portante L2	$120f_0 = 1227.60$ (λ=24.4 cm)
Codice C/A	$f_0 = 10.23$
Codice P	$0.1\ f_0 = 1.023$
Codice W	$0.2\ f_0 = 0.5115$
Messaggio di navigazione D	$f_0/204600 = 50$ Hz

2.5 MODALITA' DI MISURA CON IL SISTEMA GPS

Il posizionamento, ovvero il calcolo delle coordinate di determinati punti dello spazio, può essere ottenuto utilizzando il segnale in due diversi modi, a seconda del livello di precisione desiderata e del campo di applicazione.

2.5.1 METODO DELLA PSEUDODISTANZA

Il primo metodo descritto riguarda la determinazione della pseudodistanza (Fig.6), ovvero la distanza tra il satellite e il ricevitore in funzione dello sfasamento temporale tra il segnale inviato dal satellite e quello generato dal ricevitore GPS. Assicurandosi che i codici generati da quest'ultimi siano sincronizzati, il segnale che parte dal satellite arriva sfasato rispetto a quello del ricevitore di un tempo uguale a quello impiegato dal segnale stesso a compiere il tragitto. Tale grandezza (range) è rappresentata nella figura sotto

dove in particolare con l'indice i è rappresentato un generico ricevitore e con j un generico satellite.

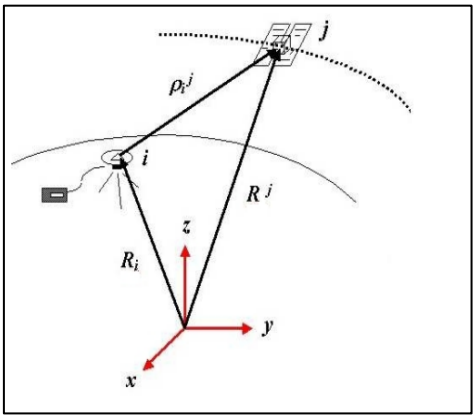


Figura 6: Pseudodistanza

L'intervallo di tempo (Δt_i) è direttamente proporzionale alla distanza tra i due oggetti, la quale viene determinata mediante tale relazione:

$$\boxed{|\vec{r} - \vec{R}| = \rho_i^j = \Delta t_i \cdot c}$$

ricavando così la seguente equazione di osservazione:

$$\boxed{\Delta t_i \cdot c = \sqrt{(X^j - X_i)^2 + (Y^j - Y_i)^2 + (Z^j - Z_i)^2} + c \cdot \delta_t + d_{ion} + d_{trop}}$$

Da tale relazione è possibile determinare le tre coordinate del ricevitore (X_i, Y_i, Z_i) e l'intervallo di tempo Δt_i, mediante la conoscenza delle coordinate j-esime del satellite e supponendo che siano quantificabili le misure di d_{ion} e d_{trop}, che permettono di non trascurare il passaggio del segnale attraverso la ionosfera e la troposfera, e di δ_t, necessario per valutare la non perfetta sincronizzazione tra l'orologio del satellite e quello del ricevitore. Dunque, per effettuare un rilevamento spaziale è necessario osservare contemporaneamente quattro satelliti. Tuttavia, sapendo che le lunghezze d'onda del codice C/A e P risultano pari a $\lambda_{C/A}$= 300 m e λ_P= 30 m, la precisione con la quale si determina la distanza tra i due oggetti è dell'ordine di qualche decina di metri, vale a dire insufficiente per misure di precisione topografiche.

2.5.2 METODO DELL'OSSERVABILE FASE

Nel metodo per misure di fase si agisce sull'onda radio portante depurandola dal segnale di codice ad essa "sovraimpresso". La misura consiste appunto nel confronto della fase della portante "carrier phase" con quella di un segnale di pari frequenza generato nel ricevitore. La precisione è maggiore rispetto a quella della precedente tecnica perché si opera su un segnale di lunghezza d'onda molto inferiore (19 o 24 cm anziché 30 o 300 m).

Occorre considerare ora che l'onda proveniente dal satellite è ricevuta a terra con una frequenza diversa da quella di emissione (che invece è identica a quella generata nel ricevitore) per l'Effetto Doppler, dovuto alla velocità relativa fra satellite e ricevitore.

Confrontando le due onde si ottiene un'onda detta "beat signal".

L' "osservabile", cioè la fase misurata, è definito come la differenza fra la fase del segnale proveniente dal satellite e quella del segnale generato nel ricevitore. La fase misurata coincide anche con la fase del "beat signal" ed è definita a meno di un numero intero di cicli N, incognito, detto "ambiguità".

La misura si esegue seguendo il satellite, per un certo tempo, senza perdere il suo segnale. A partire dall'istante del contatto iniziale, la grandezza fase varia con continuità e l'indeterminazione N resta costante sul valore iniziale fino a che la ricezione rimane continua.

Come nel metodo precedente, anche in questo caso non si possono trascurare gli effetti dovuti al passaggio del segnale nella ionosfera e troposfera e alla non perfetta sincronizzazione degli orologi. Detto ciò, utilizzando un numero di equazioni pari ai satelliti usati nell'osservazione, è possibile scrivere l'equazione della distanza in cui compaiono cinque incognite: X_i, Y_i, Zi, δt_{sincr} *e* N nella forma:

$$\boxed{\frac{\Delta\varphi}{2\pi}\lambda + \mathrm{N}\cdot\lambda = \sqrt{(X^j - X_i)^2 + (Y^j - Y_i)^2 + (Z^j - Z_i)^2} + c\cdot\delta t_{sincr} - d_{ion} + \mathrm{N}\cdot\lambda}$$

Il metodo operativo per eliminare l'indeterminazione N consiste nel lasciare una fase di inizializzazione abbastanza lunga da permettere di utilizzare opportuni algoritmi, detti metodo differenziali a differenze doppie, che consentono l'eliminazione di tale incognita. Il tempo di inizializzazione è determinato dal tipo di apparecchiatura (singola o doppia frequenza), dal momento della giornata (durante la notte il tempo risulta circa la metà di

quello necessario durante il giorno per gli effetti della ionosfera), dalla precisione cercata e dalla distanza dei due ricevitori [7].

2.6 ERRORI DEL GPS

Come detto precedentemente, la determinazione delle coordinate di un punto a terra si ottiene eseguendo una misura di distanza tra il satellite e il ricevitore, considerando nota la posizione del satellite in base alle sue effemeridi. Risulta quindi evidente che la precisione del posizionamento GPS sarà influenzata da una serie di errori che verranno elencati di seguito.

In primo luogo, troviamo errori nella definizione dell'orbita nominale dei satelliti, ovvero il percorso calcolato e previsto dalla stazione di controllo. L'orbita può essere soggetta a variazioni, causata dall'attrazione dei corpi celesti o da altri fenomeni, provocando così errori nell'individuazione del satellite nello spazio e, dato che tale informazione viene inviata al ricevitore a terra, essa è origine di errori nella misurazione della distanza tra satellite e ricevitore. Inoltre, per motivi militari, può essere attivata la SA (Selective Availability) che ha l'effetto di fornire orbite manipolate e tempi dell'orologio del satellite anch'essi modificati.

Successivamente, si possono trovare errori derivanti dallo sfasamento temporale degli orologi dei satelliti e dalla non sincronizzazione degli orologi dei ricevitori.

Un ulteriore imprecisione riguarda la propagazione del segnale in quanto, quest'ultimo, si propaga in un mezzo che non è sempre approssimabile al vuoto: l'attraversamento dell'atmosfera comporta fenomeni di rifrazione che hanno luogo nella ionosfera e nella troposfera. L'effetto della rifrazione causa un ritardo nella propagazione del segnale GPS inviato dal satellite: nella ionosfera (livello compreso tra i 50 e i 1100 km di quota) tale ritardo è dovuto al contenuto ionico nei vari strati, il quale è legato a diversi fattori, tra cui l'attività solare e l'attività del campo elettromagnetico. Essendo la ionosfera un mezzo dispersivo, il ritardo dipende dalla frequenza del segnale, per cui utilizzando ricevitori a doppia frequenza è possibile eliminare tale influenza. L'effetto della rifrazione troposferica invece non può essere eliminato mediante le doppie frequenza non essendo la troposfera un mezzo dispersivo, ma esso dipende solo dai parametri atmosferici, quali

umidità, pressione, temperatura ed aumenta per angoli di elevazione superiori ai 15º e di conseguenza può essere rimosso combinando le frequenze delle portanti.

Inoltre, il segnale può subire variazioni a causa delle riflessioni multiple (multipath). Il fenomeno consiste nel fatto che all'antenna del ricevitore possono giungere, oltre al segnale proveniente direttamente dal satellite, segnali che hanno subito riflessioni sugli oggetti circostanti quali: specchi d'acqua, palazzi vetrati, pareti rocciose. Per limitare il ritardo del segnale al ricevitore è importante la scelta del luogo di stazione.

Diversamente, si parla di Cycle Slip, nel caso in cui, per una qualsiasi ragione, si abbia l'interruzione della ricezione del segnale anche da un solo satellite. Questo porta alla sospensione del tracking della fase e soprattutto ad un aumento del numero di "ambiguità", entrando così come incognite nel calcolo della distanza, come visto precedentemente.

Risulta importante, per una corretta determinazione del punto a terra, la conoscenza di alcuni parametri che tengano conto della distribuzione spaziale dei satelliti. È evidente come una cattiva disposizione di quest'ultimi in un dato istante generi una geometria debole e di conseguenza un cattivo posizionamento; quindi, è necessario definire un parametro che tenga conto di questa geometria e che sia in grado di valutare la sua possibile evoluzione nel tempo. Il criterio utilizzato viene detto DOP (Dilution of Precision) con il quale si indica il grado di indebolimento della geometria satellitare; di conseguenza si andranno a ricercare i valori di DOP più bassi possibile. Esistono una serie di criteri geometrici che permettono di stabilire la bontà della distribuzione satellitare a seconda del tipo di rilievo a cui si è interessati:

- HDOP (Horizontal Dilution Of Precision) che quantifica l'indebolimento della geometria per un posizionamento planimetrico;
- VDOP (Vertical Dilution Of Precision) che quantifica l'indebolimento della geometria per un posizionamento altimetrico;
- TOP (Time Dilution Of Precision) che quantifica l'indebolimento della geometria per una determinazione del tempo in un luogo dato;
- POP (Position Dilution Of Precision) che quantifica l'indebolimento della geometria per un posizionamento 3D in un istante dato;

- GDOP (Geometric Dilution Of Precision) che quantifica l'indebolimento della geometria per un posizionamento 3D nel tempo e nello spazio.

Infine, l'operatore deve tener conto di una serie di attenzioni, come il centramento dell'antenna sul punto di stazione e la misura dell'altezza strumentale, le quali possono portare ad errori grossolani nel trattamento dei dati. Tali considerazioni verranno riprese nel capitolo riguardante la progettazione ed acquisizione della rete PODELNET.

2.7 TECNICHE DIFFERENZIALI

Dopo aver descritto le diverse sorgenti di errori nelle misurazioni GPS, si nota come sia il metodo della pseudodistanza che quello dell'osservabile fase, siano caratterizzati da diverse imprecisioni. Le tecniche differenziali riescono a ridurre queste cause di incertezza e risolvono inoltre il problema dovuto all'ambiguità N. Il procedimento più frequente consiste in successive combinazioni lineari delle equazioni di osservazione di fase eliminando progressivamente i parametri incogniti. Analizziamo ora tre diverse varietà di combinazioni.

- Osservazioni alle differenze singole (Fig.7)

In questo caso si pensi ad un secondo ricevitore operante contemporaneamente al primo: in questa maniera si ha la possibilità di eseguire nello stesso istante due misure di fase, una per ogni ricevitore, rispetto allo stesso satellite, potendo quindi scrivere due equazioni di distanza. Si definisce differenza singola ("single difference", SD) la differenza fra le fasi misurate su uno stesso satellite nella medesima "epoca" dai due ricevitori. L'equazione di osservazione "alla differenza singola" è una combinazione lineare delle due equazioni che si possono scrivere e nella quale scompare lo sfasamento temporale del satellite, che è il medesimo nelle due equazioni di cui si è eseguita la differenza. Nell'equazione si viene ad avere un'incognita in meno rispetto al caso trattato attraverso l'utilizzo di un solo ricevitore.

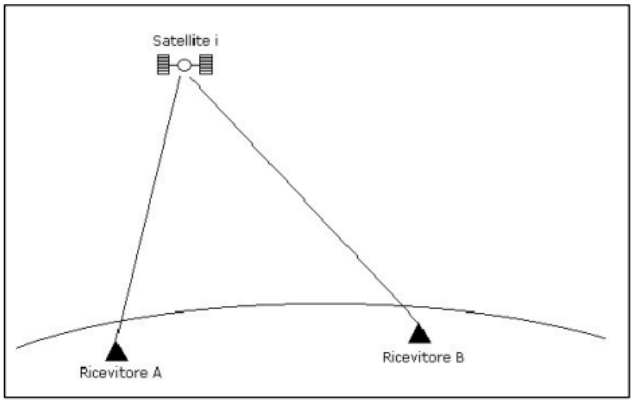


Figura 7: ODS

- Osservazioni alle differenze doppie (Fig.8)

Si pensi ora alla possibilità di ricezione contemporanea del segnale da due satelliti diversi sempre con la configurazione precedente di due stazioni riceventi. In questo modo si possono scrivere due equazioni alle differenze singole in riferimento ai due satelliti. Eseguendo la differenza fra le due equazioni alle differenze singole, si ottiene un'equazione definita come differenza doppia ("double difference", DD). In quest'ultima non sono più presenti gli sfasamenti temporali degli orologi dei due ricevitori.

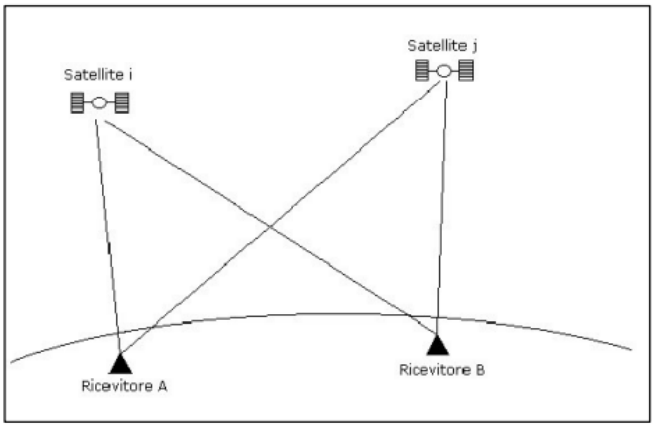


Figura 8: ODD

- Osservazioni alle differenze triple (Fig.9)

Infine, la terza categoria di equazioni differenziali è rappresentata dall'osservabile differenza tripla ("triple difference", DT) tramite il quale si studia la relazione tra il satellite, il ricevitore e il tempo, ossia si determina la differenza doppia tra due epoche

differenti. Facendo così, oltre agli errori già rimossi con la differenza doppia, si individuano gli Cycle-Slip e si correggono anche gli errori relativi all'ambiguità.

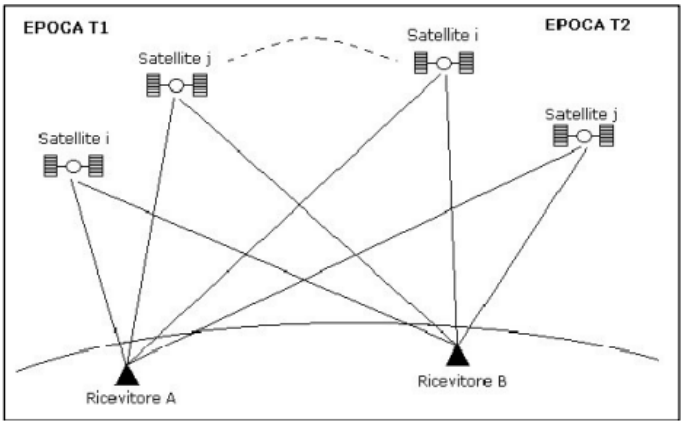


Figura 9: ODT

2.8 SISTEMI DI RIFERIMENTO DEL GPS

Nella determinazione delle coordinate dei punti dello spazio, assume un aspetto rilevante la scelta del sistema di riferimento. Quello normalmente usato dal sistema GPS è stabilito dal World Geodetic System WGS84. Tale sistema terrestre convenzionale (CTS) è costituito da un sistema cartesiano geocentrico (O, X, Y, Z) con l'origine coincidente con il centro di massa della Terra, l'asse Z passante per il polo Nord convenzionale definito dal BIH (ufficio internazionale di geodesia) al 1984.0, l'asse X passante per il meridiano di Greenwich e l'asse Y tale da formare una terna destrorsa. Questo sistema è assoluto e rimane invariato per tutti i punti del globo. Il sistema WGS84 è associato a un ellissoide, anch'esso geocentrico, detto GRS80, avente una definizione puramente geometrica e generato dalla rotazione di un'ellisse attorno all'asse di rotazione (asse polare), fornendo la base rispetto alla quale vengono misurate le quote dei punti. L'ellissoide è caratterizzato da un certo semiasse maggiore, un semiasse minore e dal loro rapporto definito come schiacciamento. La posizione di un punto P può essere definita mediante le coordinate cartesiane (X,Y,Z) oppure mediante le coordinate geografiche (φ, λ, h), dove per φ s'intende la latitudine, ossia l'angolo formato tra la retta normale all'ellissoide, passante per il punto P, e il piano equatoriale; con λ si definisce la longitudine, ovvero l'angolo di cui deve ruotare il meridiano fondamentale (Greenwich) per sovrapporsi al piano meridiano che contiene il punto P; con h si rappresenta la quota ellissoidica, vale a

dire l'altezza del punto P calcolato rispetto all'ellissoide e misurata lungo la normale all'ellissoide passante per tale punto. Di conseguenza, definendo la quota geoidica o ortometrica H come l'elevazione rispetto al livello medio del mare, è possibile ottenere l'ondulazione geoidica n (Fig.10) facendo la differenza tra la quota ellissoidica e quest'ultima.

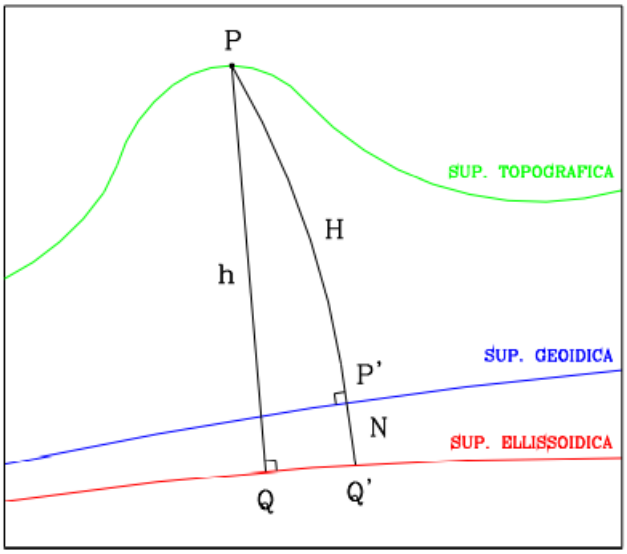


Figura 10: Ondulazione geoidica

Il sistema WGS84, che viene denominato in modo più corretto come ITRS (International Terrestrial Reference System), è stato determinato dallo IERS (International Earth Rotation Service), attraverso misure di geodesia spaziale.

Un sistema geodetico rimane una definizione astratta non utilizzabile nella pratica fino a che non viene "realizzato", cioè concretizzato in una serie di punti fisici realmente esistenti sul territorio e che costituiscono appunto le reti geodetiche di riferimento.

Esistono varie realizzazioni dell'ITRS denominate ITRFXX, dove XX è l'epoca di realizzazione. Gli ITRF costituiscono quindi una serie di realizzazioni riferite ad epoche diverse; il sistema è infatti sensibile al moto delle placche tettoniche quindi, le coordinate delle stazioni cambiano nel tempo; le realizzazioni devono dunque essere aggiornate frequentemente per rimanere coerenti con la realtà fisica.

L'Italia considera in realtà una versione dell'ITRS definita dall'EUREF per l'Europa: ETRS89 (EuropeanTerrestrial Reference System); dal 1996 l'IGM adotta quindi il

sistema ETRS89 nella versione ETRF89(89) realizzato sul territorio europeo dalla rete EUREF.

Le reti che materializzano i sistemi di riferimento possono essere di due tipi:

- Reti STATICHE costituite da vertici stazionabili;
- Reti DINAMICHE costituite da stazioni GNSS permanenti, riceventi cioè con continuità.

In Italia esistono due realizzazioni del sistema di riferimento geodetico.

La prima è una rete statica chiamata IGM95(Fig.11), ed è composta all'impianto da 1230 vertici con interdistanza media di 20 km materializzati e sparsi sul territorio nazionale. Oggi è raffittita ad oltre 2000 vertici con altri 3000 vertici aggiunti tramite raffittimenti regionali a 7 km.

Figura 11: Rete geodetica IGM95

La seconda è una rete dinamica chiamata RDN (Rete Dinamica Nazionale) (Fig.12). È stata realizzata sempre dall'IGM con lo scopo di rendere più efficace la metodologia di posizionamento GNSS in tempo reale definita come RTK (Real Time Kinematic) attraverso appunto la realizzazione di reti di stazioni permanenti coordinate che forniscano un Servizio di Posizionamento in Tempo Reale: NRTK (Network Real Time Kinematic).

Il metodo NRTK risulta molto efficace, e quindi molto richiesto dall'utenza tecnica, ma necessita di grande precisione nella definizione della posizione delle stazioni permanenti. L'IGM deve quindi definire un nuovo e più preciso sistema che viene ufficializzato il primo gennaio 2009, denominato ETRF2000 e realizzato appunto dalla RDN.

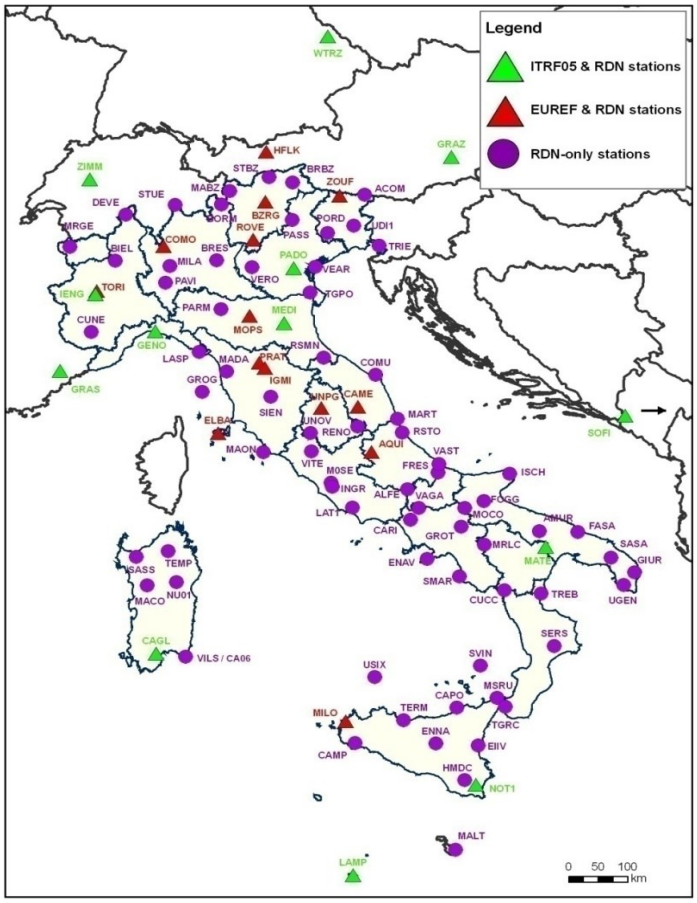


Figura 12: Rete Dinamica Nazionale

Composta da 100 stazioni omogeneamente distribuite con interdistanza media circa 100÷150 km. Le Stazioni sono appartenenti ad Enti Pubblici che inviano giornalmente i dati al Centro di Calcolo dell'IGM. Il continuo monitoraggio della rete ha permesso il raggiungimento di elevate precisioni nelle coordinate dei vertici e delle loro velocità.

2.9 METODI DI RILIEVO GNSS

I metodi di rilievo del GNSS possono essere di diverso tipo [9]:

- Posizionamento assoluto: viene eseguito con un solo ricevitore stabile, utilizza solo i segnali ricevuti dai satelliti GNSS, tuttavia, si ottengono precisioni basse;
- Posizionamento statico relativo: viene eseguito con due o più ricevitori fissi e determina la posizione relativa, ovvero la differenza tra le coordinate della posizione delle antenne (baseline), con un grado di accuratezza inferiore al cm; è il metodo che consente di ottenere la precisione massima della metodologia GNSS soprattutto se le modalità di acquisizione sono a lunga permanenza; questo è il metodo utilizzato nel calcolo della rete PODELNET;
- Posizionamento RTK: viene eseguito con un ricevitore GNSS che oltre ai segnali dei satelliti riceve, attraverso rete radio o GSM, le cosiddette correzioni dal Servizio di Posizionamento NRTK collegato che permettono di ottenere le coordinate del ricevitore con precisione centimetrica in tempo reale.

3. RETE GEODETICA PODELNET

3.1 PROGETTAZIONE DELLA RETE

La progettazione della rete è finalizzata a ricercare le migliori strategie di misura, sia dal punto di vista logistico (spostamento di mezzi, attrezzatura e operatori) sia dal punto di vista della configurazione geometrica della rete stessa.

La rete PODELNET è stata istituita nel 2016 dal Laboratorio di Rilevamento e Geomatica del dipartimento ICEA nell'ambito di un accordo di collaborazione scientifica e di ricerca con la Regione del Veneto e l'Istituto Geografico Militare Italiano.

Dal punto di vista scientifico la rete fa parte di una serie di studi e ricerche che il laboratorio LRG ha messo in atto nell'area del delta Po e che attraverso l'applicazione integrata di metodologie geomatiche vogliono mettere in luce le deformazioni plano-altimetriche superficiali e la loro evoluzione nel tempo.

Parallelamente la PODELNET è stata progettata in modo da costituire un raffittimento a 7 km della rete geodetica di riferimento nazionale IGM95.

La disposizione dei vertici è stata studiata, sempre in stretta collaborazione con l'IGM, in modo tale da garantire le seguenti caratteristiche:

- la posizione dei vertici deve garantire un'ottimale ricezione dei segnali trasmessi dalle costellazioni GNSS;
- l'interdistanza tra i vertici non superiore ai 7 chilometri;
- l'inclusione dei vertici esistenti appartenenti alla rete nazionale IGM95, dei vertici VTR della Regione del Veneto, dei vertici dei consorzi di bonifica, dei vertici di altri Enti;
- la rete deve includere naturalmente le stazioni permanenti presenti nell'area che sono in numero di 3: (TGPO) a Taglio di Po (RO) facente parte della rete GNSS del Veneto ed anche della rete RDN nazionale; (PTO1) a Porto Tolle (RO) facente parte della rete privata HEXAGON della casa costruttrice Leica e (CODI) a Codigoro (FE) sostituita nel 2022 da (VCCL) a Vaccolino (FE) appartenente alla rete privata TOPNET della ditta Topcon.

La denominazione dei vertici della rete è stata imposta dall'IGM secondo le specifiche stabilite per la rete nazionale IGM95. Ogni punto viene identificato con un codice numerico univoco di 6 cifre; le prime 3 indicano il foglio della carta d'Italia alla scala 1:100.000 nel quale il punto ricade, le ultime 3 sono una numerazione progressiva interna al foglio, la quarta è sempre superiore a 5. Inoltre, si può notare, nelle tabelle sottostanti, come alcuni vertici presentino come settimo carattere la lettera 'A'. Quest'ultima indica che tali punti sono associati, vale a dire che gli originali non godevano di buona ricezione satellitare poiché disposti sotto alberi oppure in luoghi non idonei all'acquisizione di dati.

Di seguito riporto le tabelle con l'elenco dei 50 vertici PODELNET con le loro coordinate ellissoidiche geografiche e la relativa mappatura distinte per la parte nord (Fig.13) e la parte sud della rete (Fig.14).

Il vertice denominato CODI22, non ancora codificato dall'IGM, è stato inserito nella campagna 2022 nelle vicinanze della ex stazione permanente CODI, che è stata dismessa, per avere una continuità dei dati acquisiti in tale località e per non peggiorare la conformazione geometrica della rete.

Tabella 1: lista dei vertici ricadenti nella parte nord della rete

ID	Latitudine [°]	Longitudine [°]	Quota Elliss. [m]
PTO1	44° 57' 05.48" N	12° 20' 02.60" E	49.27
TGPO	45° 00' 11.02" N	12° 13' 41.97" E	49.28
VCCL	44° 48' 46.75" N	12° 10' 08.39" E	47.90
CODI22	44° 49' 58.39" N	12° 06' 41.21" E	42.18
065704	45° 00' 37.43" N	12° 06' 07.31" E	41.66
065705	45° 01' 44.11" N	12° 15' 49.75" E	43.55
065706	45° 03' 00.80" N	12° 21' 57.72" E	44.59
065707A	45° 02' 55.46" N	12° 10' 41.91" E	43.78
065708	45° 06' 34.87" N	12° 14' 34.99" E	46.66
065715	45° 03' 57.20" N	12° 14' 53.68" E	42.34
065901	45° 00' 24.68" N	12° 19' 42.54" E	52.34
065903	45° 07' 52.95" N	12° 19' 27.57" E	44.68
065904	45° 05' 45.41" N	12° 19' 30.40" E	43.32
065905	45° 01' 40.27" N	12° 11' 17.66" E	53.02
065906	45° 01' 52.95" N	12° 24' 39.52" E	46.14
065907	45° 01' 15.35" N	12° 21' 28.51" E	45.01
065908	45° 00' 08.45" N	12° 25' 01.54" E	44.62
065909	45° 02' 41.89" N	12° 18' 21.55" E	40.61
077703	44° 48' 09.86" N	12° 15' 36.28" E	43.58
077704	44° 49' 14.09" N	12° 11' 11.98" E	41.24
077707	44° 56' 40.92" N	12° 07' 14.21" E	47.24
077708	44° 47' 43.54" N	12° 23' 38.18" E	44.15
077710	44° 54' 49.74" N	12° 19' 15.01" E	40.87
077712	44° 57' 48.02" N	12° 14' 42.82" E	41.17
077713	44° 57' 33.51" N	12° 24' 59.97" E	45.70

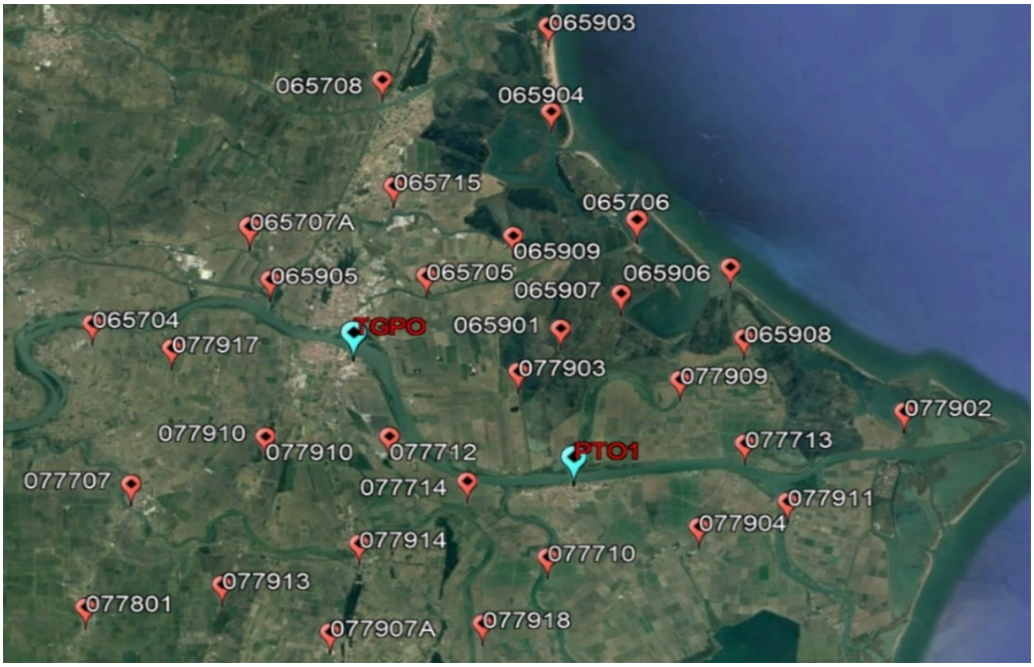


Figura 13: Mappatura della rete Podelnet- Parte nord

Tabella 2: lista dei vertici ricadenti nella parte sud della rete

ID	Latitudine [°]	Longitudine [°]	Quota Elliss. [m]
077714	44° 56' 41.42" N	12° 16' 57.30" E	41.08
077715	44° 53' 07.81" N	12° 19' 44.56" E	42.51
077716	44° 52' 13.74" N	12° 23' 14.57" E	44.25
077717	44° 49' 08.15" N	12° 23' 12.92" E	39.53
077718	44° 50' 55.18" N	12° 27' 54.23" E	42.44
077719	44° 53' 53.61" N	12° 25' 09.92" E	45.07
077720	44° 52' 27.34" N	12° 27' 46.83" E	41.94
077721	44° 51' 22.87" N	12° 22' 03.62" E	40.17
077801	44° 53' 41.46" N	12° 05' 55.26" E	42.77
077902	44° 58' 17.84" N	12° 29' 37.68" E	46.35
077903	44° 59' 21.87" N	12° 18' 28.09" E	39.44
077904	44° 55' 32.14" N	12° 23' 37.74" E	39.86
077905	44° 55' 53.14" N	12° 28' 33.56" E	42.30
077906	44° 54' 01.26" N	12° 29' 09.49" E	44.49
077907	44° 53' 13.91" N	12° 12' 37.92" E	40.92
077908	44° 51' 17.84" N	12° 18' 14.28" E	43.04
077909	44° 59' 07.94" N	12° 23' 09.13" E	39.48
077910	44° 57' 49.05" N	12° 11' 07.73" E	43.29
077911	44° 56' 07.69" N	12° 26' 12.19" E	50.63
077912	44° 51' 15.51" N	12° 10' 27.83" E	40.98
077913	44° 54' 13.18" N	12° 09' 51.61" E	40.23
077914	44° 55' 11.78" N	12° 13' 49.21" E	41.82
077916	44° 50' 09.20" N	12° 20' 35.61" E	42.40
077917	45° 00' 00.16" N	12° 08' 25.47" E	42.20
077918	44° 53' 13.37" N	12° 17' 21.53" E	39.58

Figura 14: Mappatura della rete Podelntet- Parte sud

Come per tutti i vertici della rete fondamentale italiana anche per la PODELNET le informazioni relative a ciascun vertice sono raccolte nella cosiddetta monografia (Fig. 15) [11]. Ciascuna scheda contiene:

- Denominazione specifica: indica il nome del luogo in cui il punto è situato, con annessa l'ubicazione esatta della materializzazione;
- Localizzazione amministrativa: nazione, regione, provincia e comune
- Proprietà: nome del proprietario, compreso l'indirizzo del luogo su cui il vertice è posto;
- Elementi numerici: coordinate geografiche nei vari sistemi di riferimento geodetici e cartografici, quota geoidica e quota ellissoidica del punto;
- Una o più foto del punto, con mappa cartografica;
- Materializzazione: descrizione della tipologia di contrassegno utilizzato.

Nel caso in esame i vertici sono materializzati in vario modo: contrassegni IGM di tipo C e tipo centrino universale, altri con centrini appartenenti alla Regione Veneto, alla Regione Emilia-Romagna, ai consorzi di bonifica.

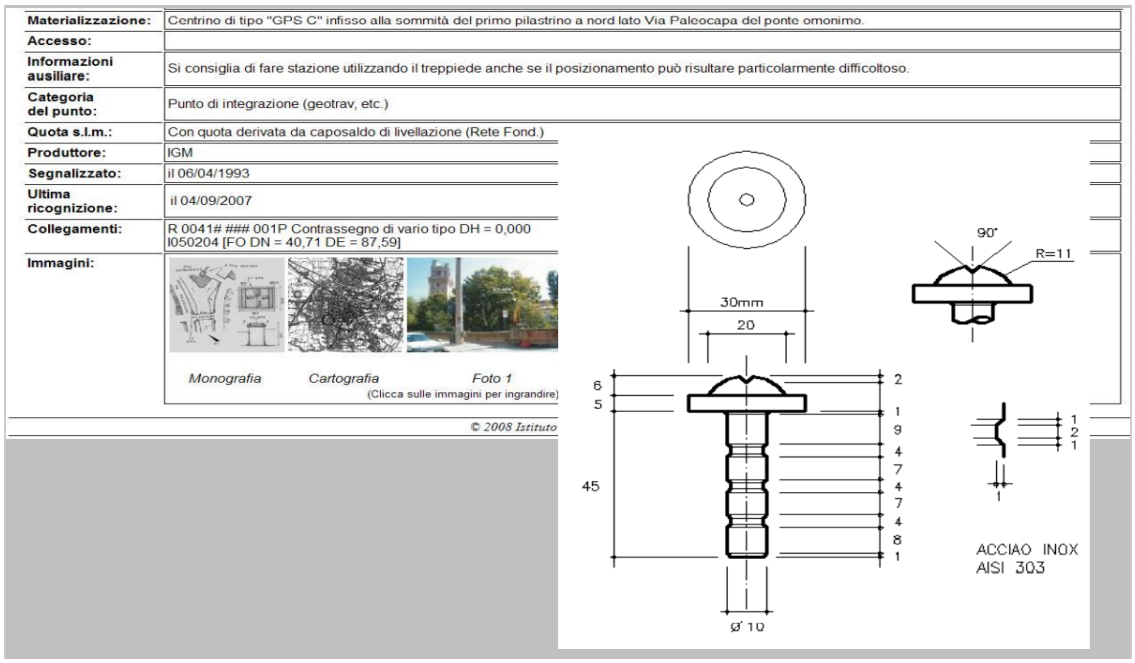
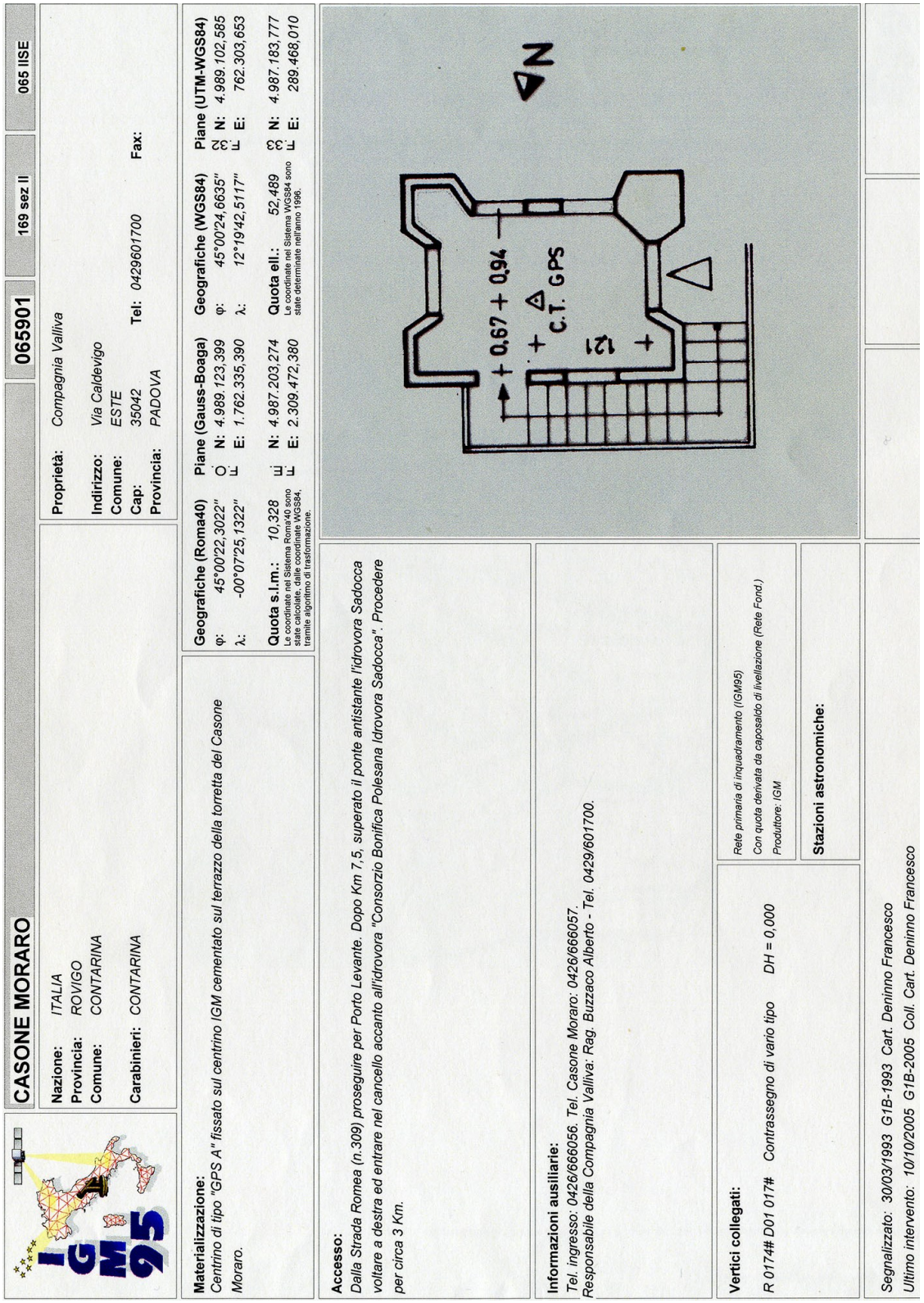


Figura 15: Esempio di monografia approssimata scaricabile dal sito IGM



IGM 95

CASONE MORARO | **065901** | **169 sez II** | **065 IISE**

Nazione: *ITALIA*
Provincia: *ROVIGO*
Comune: *CONTARINA*
Carabinieri: *CONTARINA*

Proprietà: *Compagnia Valliva*
Indirizzo: *Via Caldevigo*
Comune: *ESTE*
Cap: *35042* **Tel:** *0429601700* **Fax:**
Provincia: *PADOVA*

Materializzazione:
Centrino di tipo "GPS A" fissato sul centrino IGM cementato sul terrazzo della torretta del Casone Moraro.

	Geografiche (Roma40)	Piane (Gauss-Boaga)	Geografiche (WGS84)	Piane (UTM-WGS84)
φ:	45°00'22,3022''	N: 4.989.123,399	φ: 45°00'24,6635''	N: 4.989.102,585
λ:	-00°07'25,1322''	E: 1.762.335,390	λ: 12°19'42,5117''	E: 762.303,653
Quota s.l.m.:	*10,328*	N: 4.987.203,274	**Quota ell.:** *52,489*	N: 4.987.183,777
	Le coordinate nel Sistema Roma'40 sono state calcolate, dalle coordinate WGS84, tramite algoritmo di trasformazione.	E: 2.309.472,380	Le coordinate nel Sistema WGS84 sono state determinate nell'anno 1996.	E: 289.468,010

Accesso:
Dalla Strada Romea (n.309) proseguire per Porto Levante. Dopo Km 7,5, superato il ponte antistante l'idrovora Sadocca voltare a destra ed entrare nel cancello accanto all'idrovora "Consorzio Bonifica Polesana Idrovora Sadocca". Procedere per circa 3 Km.

Informazioni ausiliarie:
Tel. ingresso: 0426/666056. Tel. Casone Moraro: 0426/666057.
Responsabile della Compagnia Valliva: Rag. Buzzaco Alberto - Tel. 0429/601700.

Vertici collegati:
R 0174# D01 017# Contrassegno di vario tipo DH = 0,000

Rete primaria di inquadramento (IGM95)
Con quota derivata da caposaldo di livellazione (Rete Fond.)
Produttore: IGM

Stazioni astronomiche:

Segnalizzato: 30/03/1993 G1B-1993 Cart. Deninno Francesco
Ultimo intervento: 10/10/2005 G1B-2005 Coll. Cart. Deninno Francesco

Figura 16: Esempio di monografia completa acquistata presso l'IGM. Allegato A

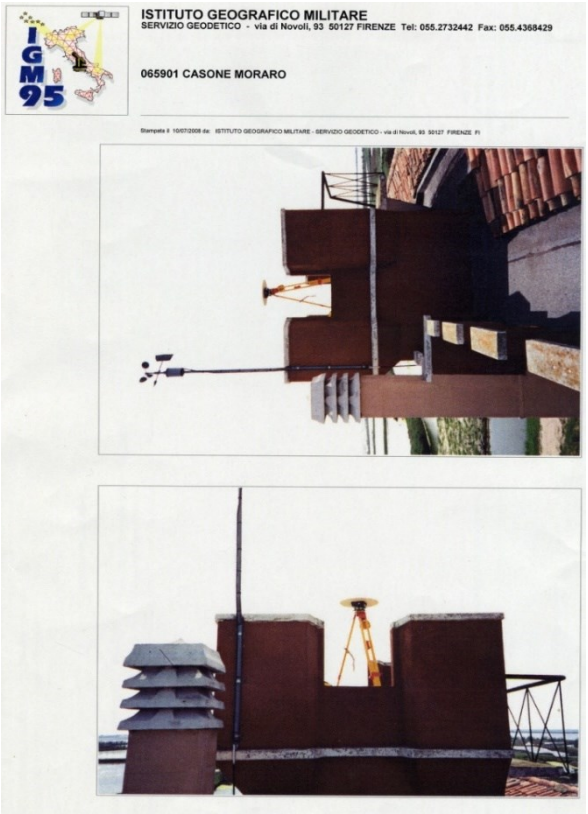


Figura 17: Esempio di monografia completa acquistata presso l'IGM. Allegato B

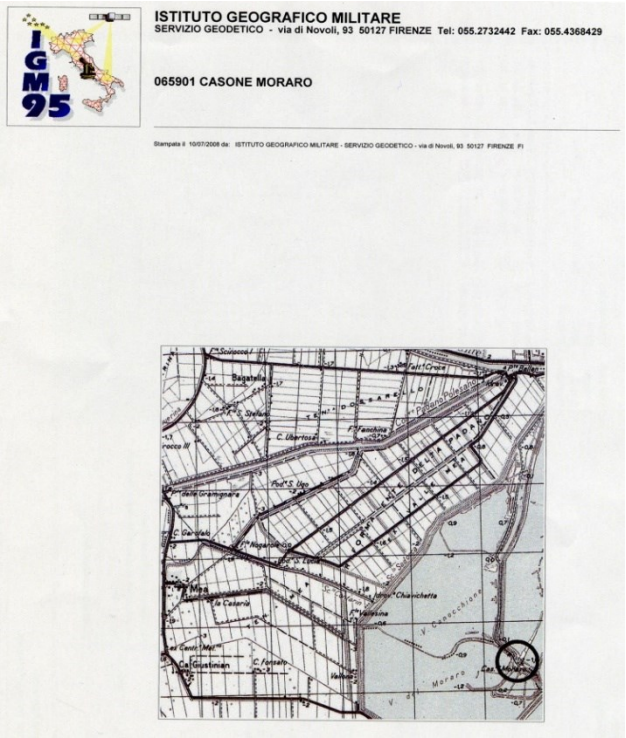


Figura 18: esempio di monografia completa acquistata presso l'IGM. Allegato C

3.2 PROGETTO ED ESECUZIONE DELLA CAMPAGNA DI MISURA

La rete PODELNET viene misurata a cadenza biennale utilizzando naturalmente la metodologia satellitare GNSS.

Nella campagna di misura del 2022 sono stati utilizzati i seguenti sette ricevitori geodetici multifrequenza: 2 Leica System 1200; 1 Leica GS14; 1 Leica GS15; 2 Leica GS16; 1 Topcon Hiper HR.

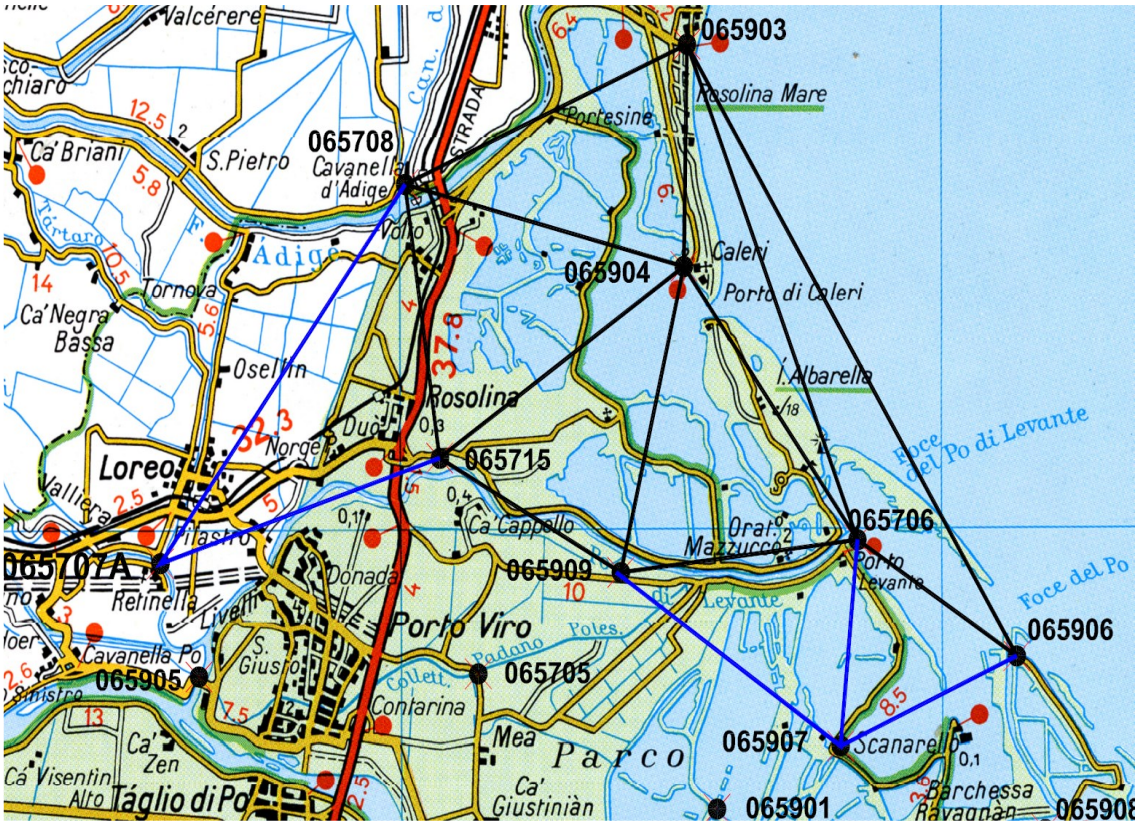
I ricevitori sono stati stazionati sui vertici della rete PODELNET in modo tale da soddisfare alle prescrizioni IGM per la misura delle reti geodetiche fondamentali:

- Acquisizione simultanea dei dati da parte di due ricevitori geodetici stazionati su una coppia di vertici della rete con permanenza maggiore o eguale alle tre ore (lunga permanenza);
- Scatto fotografico del lettore di altezza strumentale in ogni posizionamento;
- Ogni ricevitore è stato impostato con intervallo di campionamento del dato pari a 10 secondi e angolo di cut-off dei segnali satellitari pari a 10° sull'orizzonte.

Sulla base di queste prescrizioni, del numero di ricevitori a disposizione, del numero delle squadre operatrici e della presenza delle stazioni permanenti sono state programmate le sette giornate di misura, di seguito riportate mappate su carta stradale. Ciascuna di esse raffigura i collegamenti tra i vertici in diversi colori ad indicare le differenti sessioni di misura, ognuna di minimo tre ore. In allegato alla mappa dei vertici, si ha una tabella rappresentante i punti da occupare con i ricevitori durante la giornata e la squadra che dovrà occuparsene. Inoltre, lo spazio vuoto nel turno pomeridiano sta ad indicare che lo strumento non è stato spostato dalla posizione relativa alla sessione precedente.

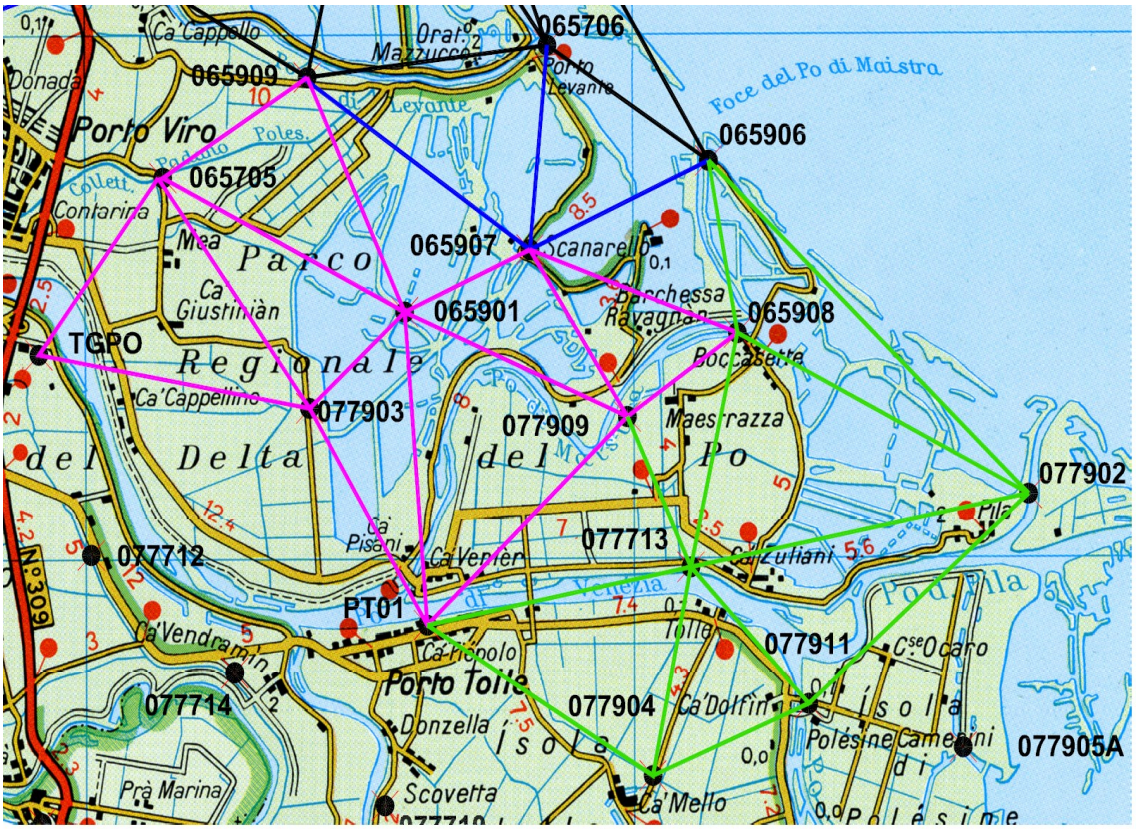
LUNEDI' 27 GIUGNO

SQUADRA	SESSIONE 1	SESSIONE 2
PRIMA SQUADRA	065708	-
	065715	-
SECONDA SQUADRA	065909	-
	065706	-
	065906	-
TERZA SQUADRA	065903	065707A
	065904	065907



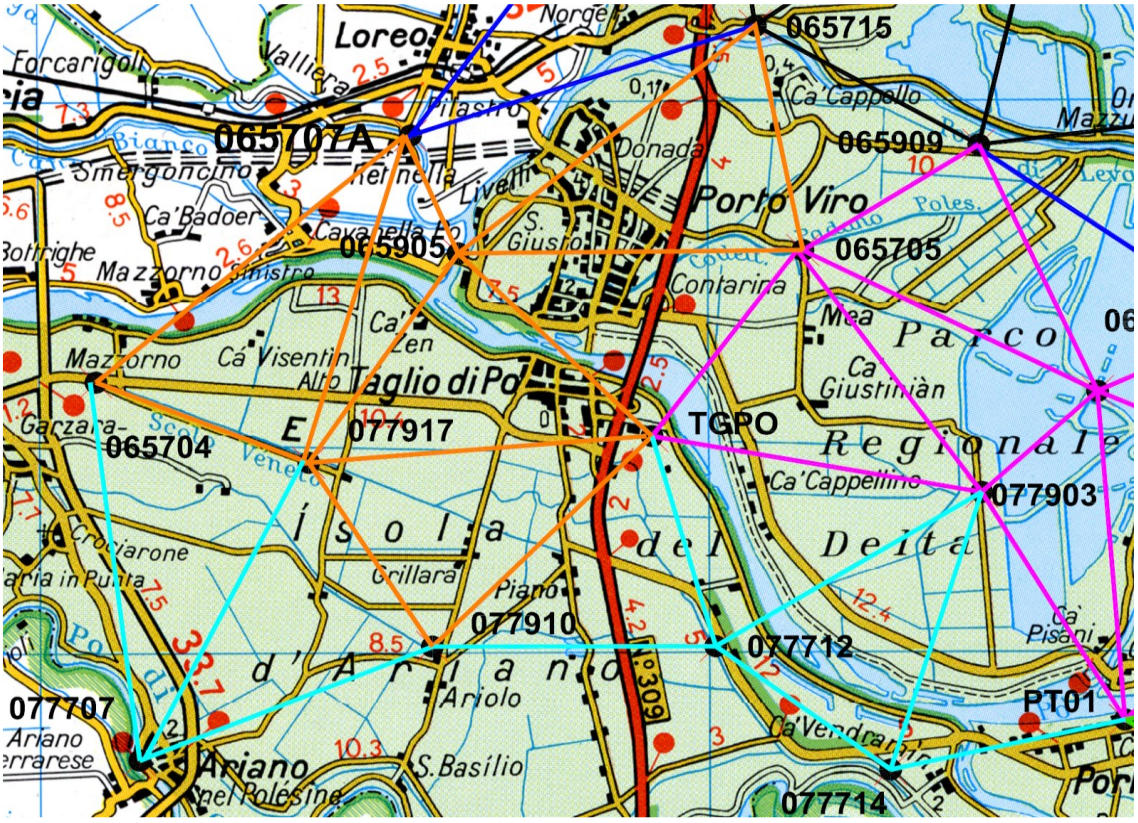
MARTEDI' 28 GIUGNO

SQUADRA	SESSIONE 1	SESSIONE 2
PRIMA SQUADRA	077903	077904
	065705	077911
SECONDA SQUADRA	065909	077902
	065901	077713
TERZA SQUADRA	065907	065906
	065908	-
	077909	-



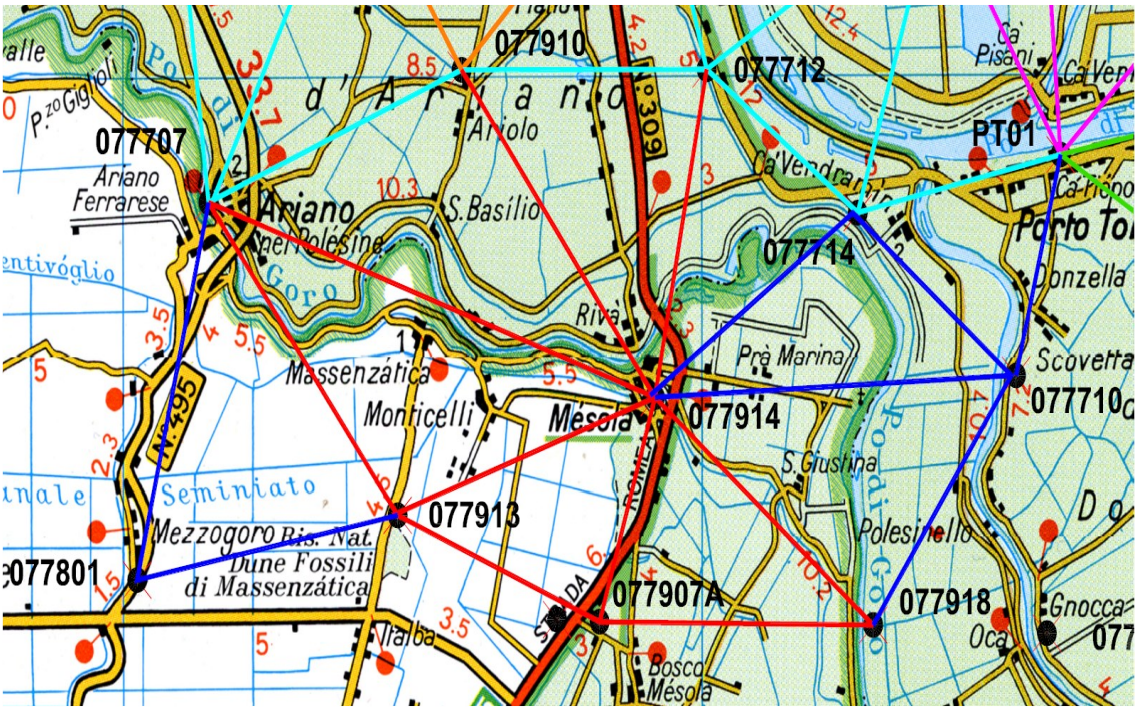
MERCOLEDI' 29 LUGLIO

SQUADRA	SESSIONE 1	SESSIONE 2
PRIMA SQUADRA	077910	-
	077917	-
SECONDA SQUADRA	065707A	077707
	065905	077712
	065704	-
TERZA SQUADRA	065715	077903
	065705	077714



GIOVEDI' 30 GIUGNO

SQUADRA	SESSIONE 1	SESSIONE 2
PRIMA SQUADRA	077712	077714
	077914	-
SECONDA SQUADRA	077910	077801
	077707	-
	077913	-
TERZA SQUADRA	077907A	077710
	077918	-

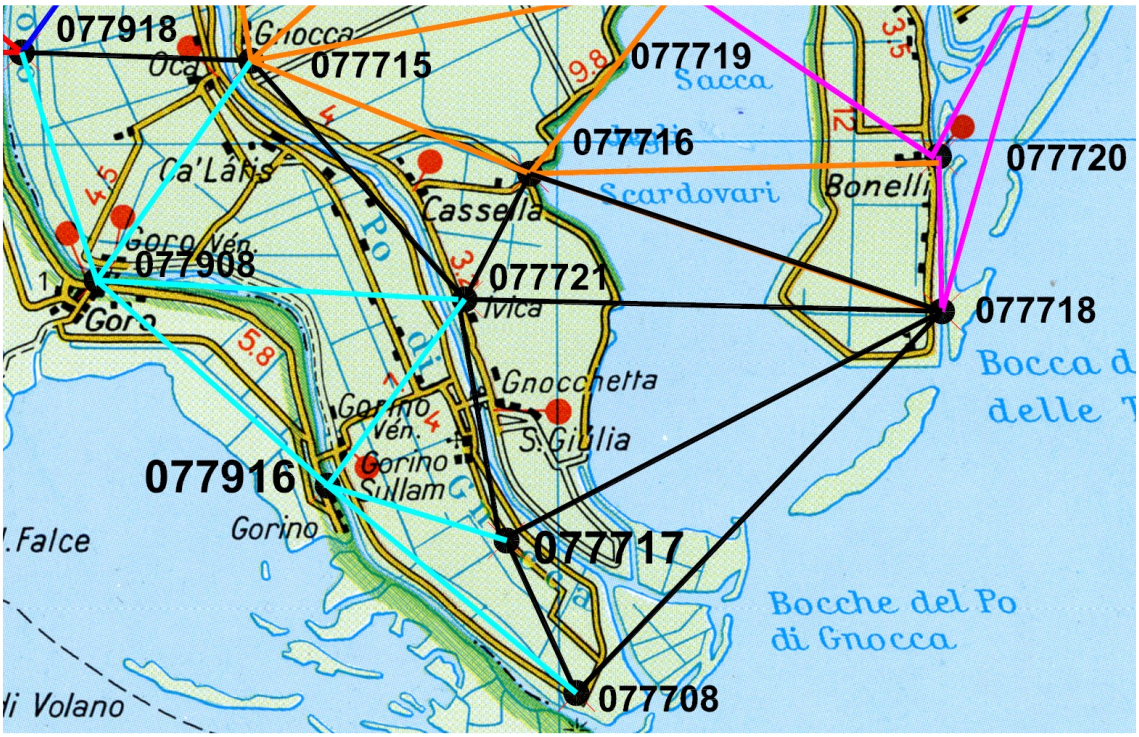


LUNEDI' 04 LUGLIO

SQUADRA	SESSIONE 1	SESSIONE 2
PRIMA SQUADRA	077902	077904
	077911	077710
SECONDA SQUADRA	077719	-
	077720	-
	077718	-
TERZA SQUADRA	077905A	077715
	077906	077716

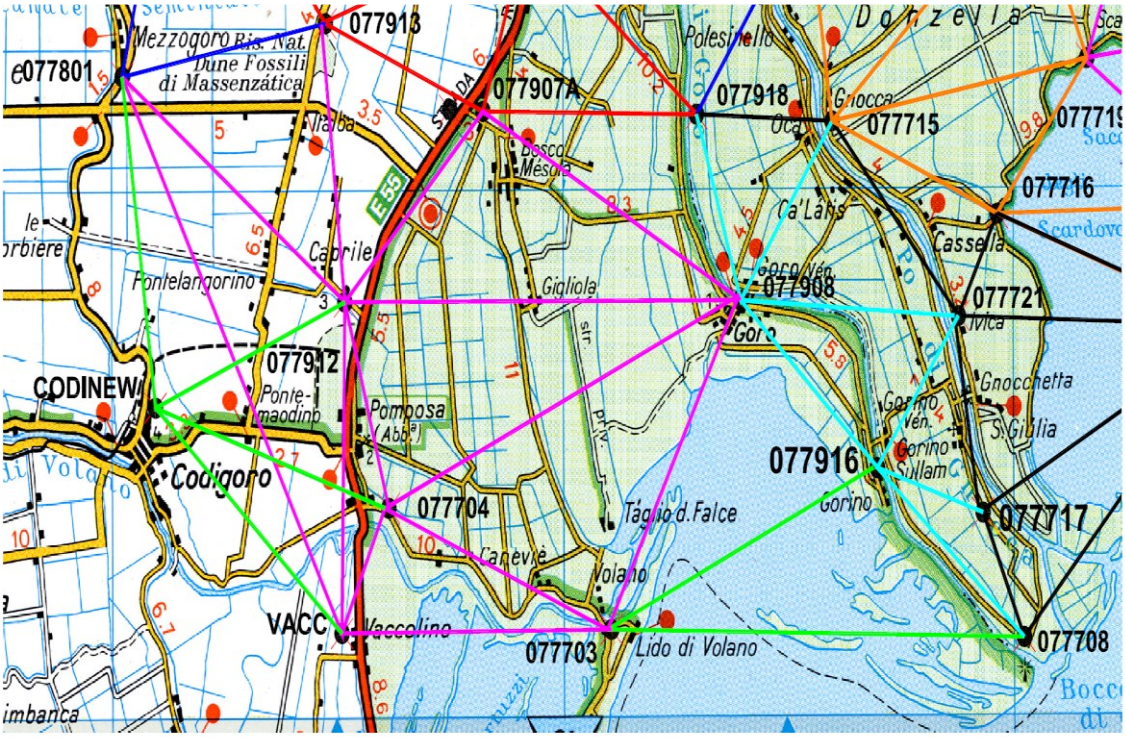
MARTEDI' 05 LUGLIO

SQUADRA	SESSIONE 1	SESSIONE 2
PRIMA SQUADRA	077717	-
	077708	-
SECONDA SQUADRA	077716	077916
	077718	077908
TERZA SQUADRA	077715	-
	077721	-
	077918	-



MERCOLEDI 06 LUGLIO

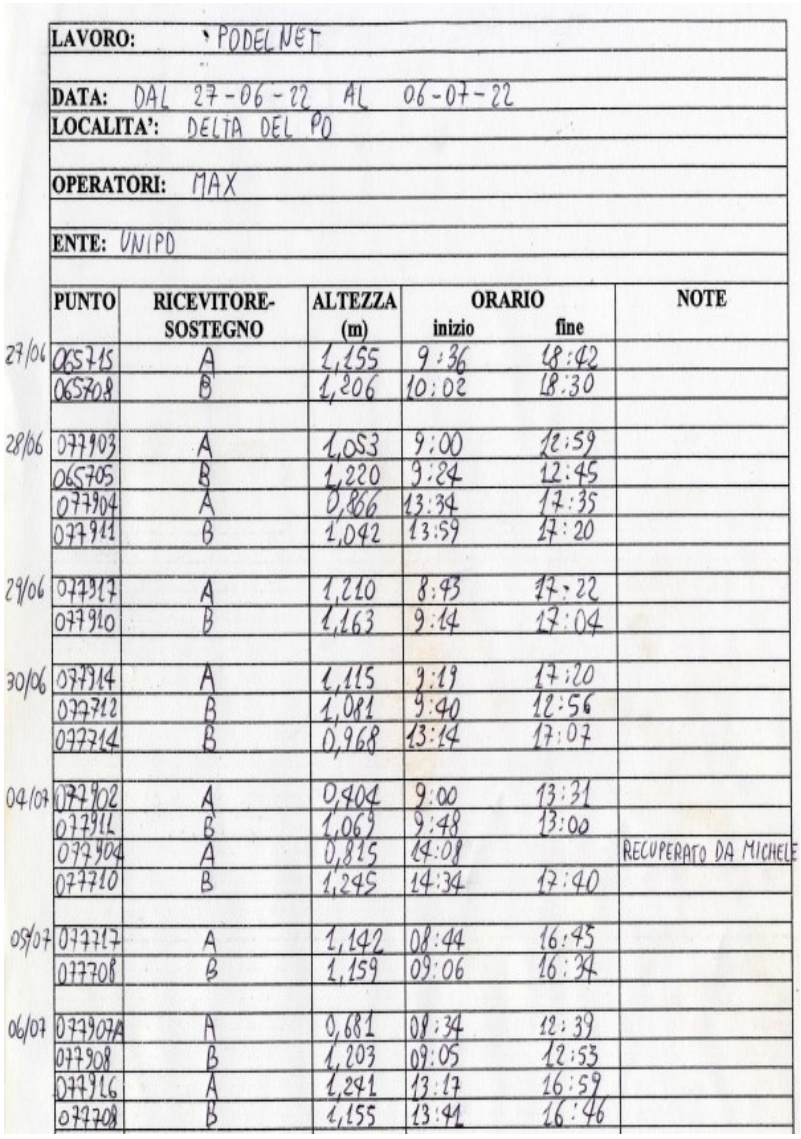
SQUADRA	SESSIONE 1	SESSIONE 2
PRIMA SQUADRA	077907A	077708
	077908	077916
SECONDA SQUADRA	077801	-
	077913	CODINEW
	077912	-
TERZA SQUADRA	077704	-
	077703	-



Ogni squadra operatrice ha inoltre proceduto alla compilazione dei fogli di campagna per poi poter controllare la correttezza delle impostazioni implementate nel ricevitore una volta stazionato nel vertice prima dell'inizio delle acquisizioni.

Nei fogli di campagna vengono annotate le seguenti informazioni (Fig.19):

- dati generali: data e luogo del rilievo, nome dell'operatore, ente responsabile;
- codice numerico del vertice;
- tipo di ricevitore utilizzato;
- valore dell'altezza strumentale (m);
- ora di inizio e fine registrazione;
- eventuali note.



LAVORO: PODELNET

DATA: DAL 27-06-22 AL 06-07-22

LOCALITA': DELTA DEL PO

OPERATORI: MAX

ENTE: UNIPD

	PUNTO	RICEVITORE-SOSTEGNO	ALTEZZA (m)	ORARIO inizio	ORARIO fine	NOTE
27/06	065715	A	1,155	9:36	18:42	
	065708	B	1,206	10:02	18:30	
28/06	077903	A	1,053	9:00	12:59	
	065705	B	1,220	9:24	12:45	
	077904	A	0,866	13:34	17:35	
	077911	B	1,042	13:59	17:20	
29/06	077917	A	1,210	8:43	17:22	
	077910	B	1,163	9:14	17:04	
30/06	077914	A	1,115	9:19	17:20	
	077912	B	1,081	9:40	12:56	
	077914	B	0,968	13:14	17:07	
04/07	077902	A	0,904	9:00	13:31	
	077912	B	1,069	9:48	13:00	
	077904	A	0,815	14:08		RECUPERATO DA MICHELE
	077910	B	1,245	14:34	17:40	
05/07	077917	A	1,142	08:44	16:45	
	077908	B	1,159	09:06	16:34	
06/07	077907A	A	0,681	08:34	12:39	
	077908	B	1,203	09:05	12:53	
	077916	A	1,241	13:17	16:59	
	077908	B	1,155	13:41	16:46	

Figura 19: esempio foglio di campagna

Durante la messa in stazione del ricevitore, l'operatore deve porre molta attenzione alla misura dell'altezza strumentale. Quest'ultima è definita come la distanza, misurata lungo la verticale, tra il vertice materializzato nel terreno ed il centro di fase che rappresenta il centro strumentale dei ricevitori satellitari.

Ogni strumento è dotato di apposito lettore di altezza che viene inserito nel supporto dello strumento e permette la misura dell'altezza lungo la verticale. A questa misura, che viene fotografata per un successivo controllo (Fig.20), devono essere aggiunte delle quantità (offset) che sono costanti determinate in laboratorio e che dipendono dal tipo di strumento stazionato.

Figura 20: Foto della lettura dell'altezza strumentale

3.3 PREDISPOSIZIONE DEI DATI ACQUISITI PER IL PROCESSAMENTO

Terminata la campagna di acquisizione dei dati mediante i sette ricevitori, si prosegue con la fase di preprocessamento in ufficio. Tale fase, precedente all'elaborazione, prevede diverse operazioni, tra cui:

- controllo correttezza altezza strumentale tra: foto, foglio di campagna, file rinex di acquisizione,
- conversione dei file raw di acquisizione dei ricevitori di marca diversa in file rinex,
- importazione dei file rinex di acquisizione dalle tre stazioni permanenti,
- importazione dei file sp3 delle effemeridi precise per ognuna delle sette giornate di acquisizione

La prima operazione di controllo dell'altezza strumentale è necessaria per verificare che il dato sia stato impostato in maniera corretta nello strumento ed eventualmente apportarne le modifiche. In primo luogo, occorre rinominare gli scatti fotografici delle altezze strumentali (Fig.23) assegnando ad ognuno la data dello scatto e il vertice a cui si riferisce. Questo sia per motivi di ordine e sia per poterle confrontare con quelle riportate nei fogli di campagna (Fig.21) e nel file RINEX (Fig.22).

	PUNTO	RICEVITORE-SOSTEGNO	ALTEZZA (m)	ORARIO inizio	fine	NOTE
27/06	065909	F ANDREA	0,956	9:41		
	065706	E "	1,525	10:06		1,165+0,360
	065906	G "	0,525	10:58		

Figura 21: estratto foglio di campagna

```
     3.01           OBSERVATION DATA    MIXED               RINEX VERSION / TYPE
TPS2RIN 1.0.24.2254 TPS-USER            20220628 141648 UTC PGM / RUN BY / DATE
win32 build Apr 15, 2020 (c) Topcon Positioning Systems     COMMENT
log20220627_065706.tps                                      COMMENT
Options: -v 3.01                                            COMMENT
Observer            Agency                                  OBSERVER / AGENCY
W1K5R1SRUO4         TPS B310            5.2.2 Dec,06,2018   REC # / TYPE / VERS
SN: 1388-12615                                              COMMENT
000                 TPSHIPER_HR     NONE                    ANT # / TYPE
        1.5250        0.0000        0.0000                ANTENNA: DELTA H/E/N
065706                                                      MARKER NAME
  4408955.2469   966632.5195  4491326.1188                 APPROX POSITION XYZ
```

Figura 22: estratto file rinex vertice 065706

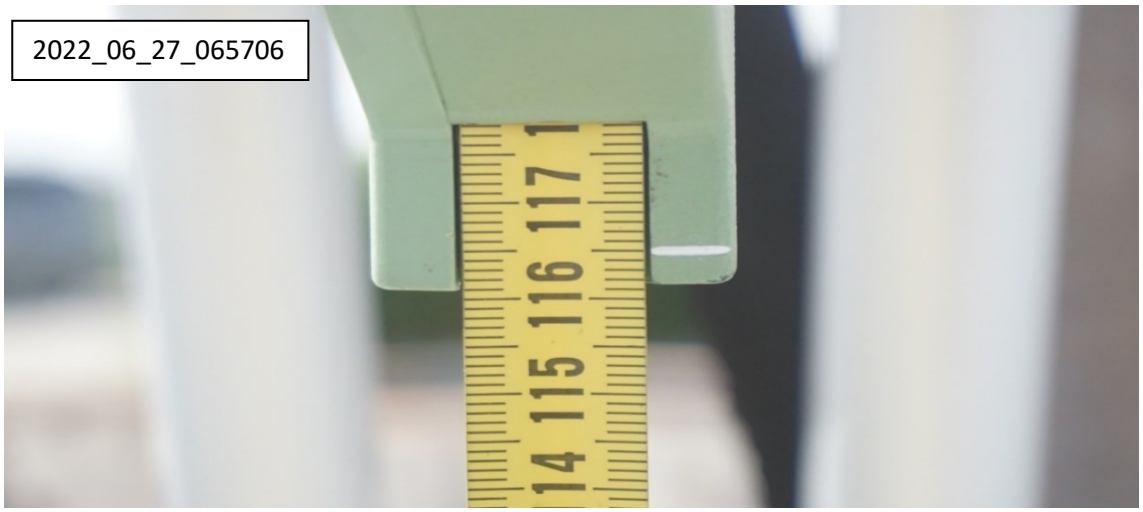


Figura 23: altezza strumentale vertice 065706

Successivamente, per permettere l'elaborazione delle basi progettate tra i singoli ricevitori, è necessario convertire i dati raw, ovvero i dati registrati dai ricevitori in formato proprietario, in file rinex (Receiver INdependent EXchange). Quest'ultimo costituisce un formato standard internazionale utilizzato per scambiare dati GPS fra ricevitori e software di differenti produttori, in quanto durante la campagna di misura sono stati utilizzati sei ricevitori di marca Leica e uno di marca Topcon. Tale operazione di conversione è stata compiuta tramite il software Infinity, per gli strumenti di marca Leica, mentre, per il ricevitore Topcon si è utilizzato il software TPS2RIN.

In seguito, è necessario importare i file rinex di acquisizione dalle tre stazioni permanenti nei giorni in cui esse sono coinvolte nel progetto della rete.

La frequenza di campionamento dei dati satellitari risulta pari a trenta secondi per le stazioni permanenti, mentre nel caso dei ricevitori posizionati nei restanti vertici è stato impostato un intervallo di dieci secondi.

Infine, per completare il preprocessamento devono essere scaricate, almeno 15 giorni dopo la fine della campagna di misura, i file sp3 delle effemeridi precise (o calcolate) per ognuna delle sette giornate di acquisizione. L'effemeride rappresenta l'elenco delle coordinate spaziali dei satelliti, relative alle posizioni assunte in istanti determinati ad intervalli di tempo costanti. Vengono scaricate in forma compatta (doppia estensione) e

messe a disposizione agli utenti sul sito della NASA (National Aeronautics and Space Administration) per calcoli che necessitano di precisioni elevate, come nel caso in esame, e sono basate sull'osservazione, da parte del segmento di controllo, delle orbite dei vari satelliti. In generale, le effemeridi precise vengono denominate sulla base della settimana GPS (WWWW), definita da quando il sistema è stato inizializzato, e del giorno in cui è avvenuta l'acquisizione dei dati (D) secondo tale codice: igsWWWWD (es: igs22161). Per la PODELNET, le effemeridi relative ai primi quattro giorni di misura (dal 27 al 30 giugno) fanno riferimento alla settimana 2216 del calendario GPS (Fig.24) mentre gli altri tre (dal 4 al 6 luglio) alla settimana 2217.

				Jun			
GPS WK	Sun	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat
2212				1	2	3	4
2213	5	6	7	8	9	10	11
2214	12	13	14	15	16	17	18
2215	19	20	21	22	23	24	25
2216	26	27	28	29	30		
				Jul			
GPS WK	Sun	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat
2216						1	2
2217	3	4	5	6	7	8	9
2218	10	11	12	13	14	15	16
2219	17	18	19	20	21	22	23
2220	24	25	26	27	28	29	30
2221	31						

Figura 24: estratto calendario GPS

3.4 ELABORAZIONE DEI DATI ACQUISITI: CALCOLO DELLE BASELINE

Con il software Infinity, della casa costruttrice Leica, si procede alla prima fase della elaborazione della rete geodetica che consiste nel calcolo delle baseline previste nel progetto e ottenibili per ognuna di esse con i dati acquisiti dai due ricevitori posti in acquisizione simultanea (con permanenza maggiore di tre ore) sui due vertici della base stessa.

All'interno dell'ambiente software viene prima realizzato un archivio per la registrazione dei dati.

Successivamente vengono importati i dati acquisiti dai sette ricevitori e dalle tre stazioni permanenti (Fig.25) giorno per giorno e già controllati e verificati nella fase precedente di preprocessamento.

Vengono quindi inserite le effemeridi precise (Fig.26), necessarie per incrementare la precisione nel calcolo delle baseline nelle reti di riferimento con basi di lunghezza maggiore di 5-6 chilometri.

Per una corretta elaborazione di ciascuna base è necessario impostare alcuni parametri (Fig.27). Tra questi risulta molto importante l'angolo di cut-off, ovvero l'inclinazione, calcolata rispetto l'orizzontale passante per l'antenna ricevente, al di sotto della quale i satelliti vengono oscurati poiché inviano segnali troppo rumorosi, in quanto percorrono distanze elevate nell'atmosfera, e che in questo caso è stata valutata pari a 10º. Inoltre, tramite una selezione manuale. si possono escludere i satelliti appartenenti alle costellazioni Glonass e Galileo, impossibili da individuare da alcuni ricevitori. Infine, come set di calibrazione dell'antenna, si usa l'NGS, il quale utilizza i parametri determinati da un laboratorio internazionale per tutte le marche di sensore.

Di seguito vengono riportati i passaggi eseguiti nel software Infinity.

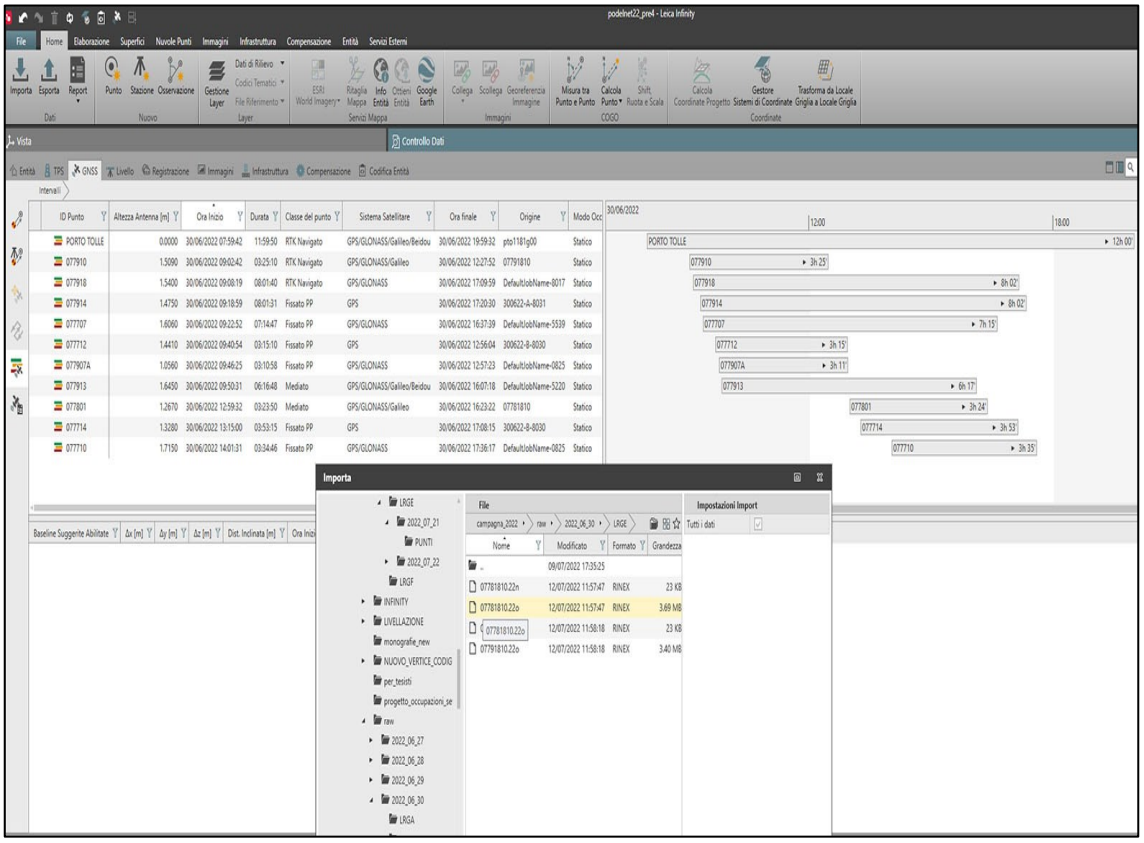


Figura 25: Inserimento dei file RINEX di ACQUISIZIONE

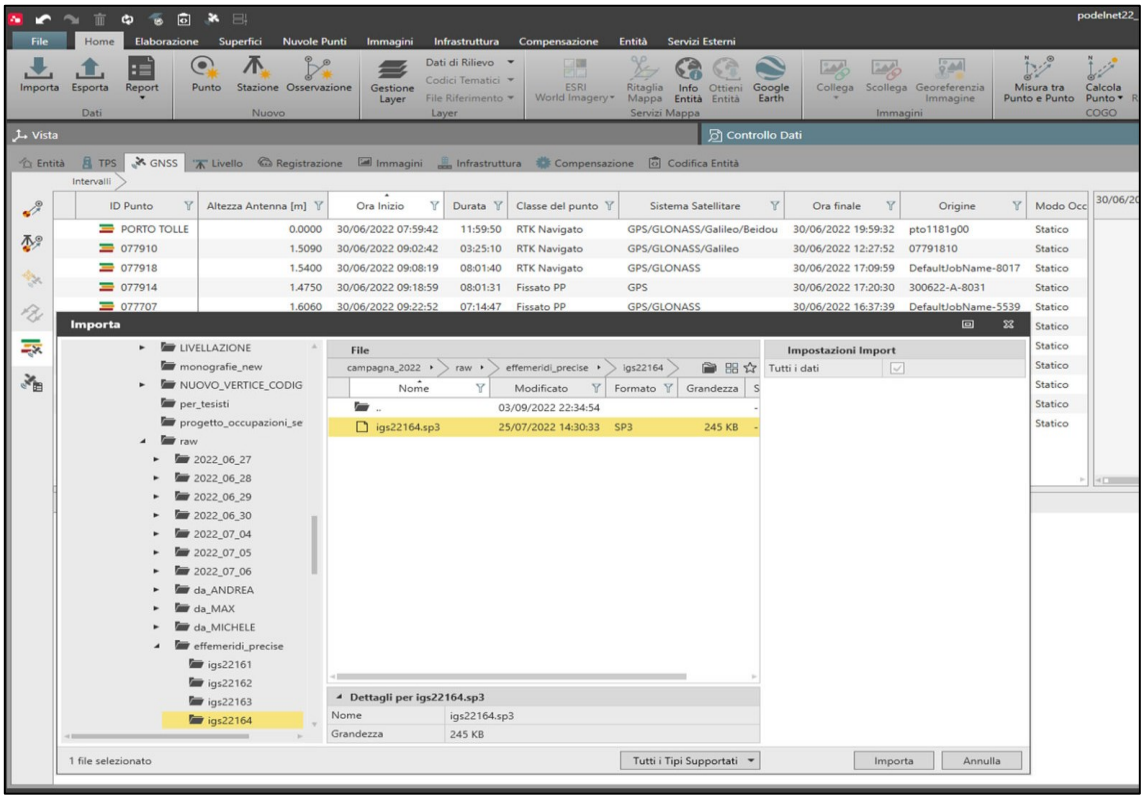


Figura 26: Inserimento delle EFFEMERIDI PRECISE

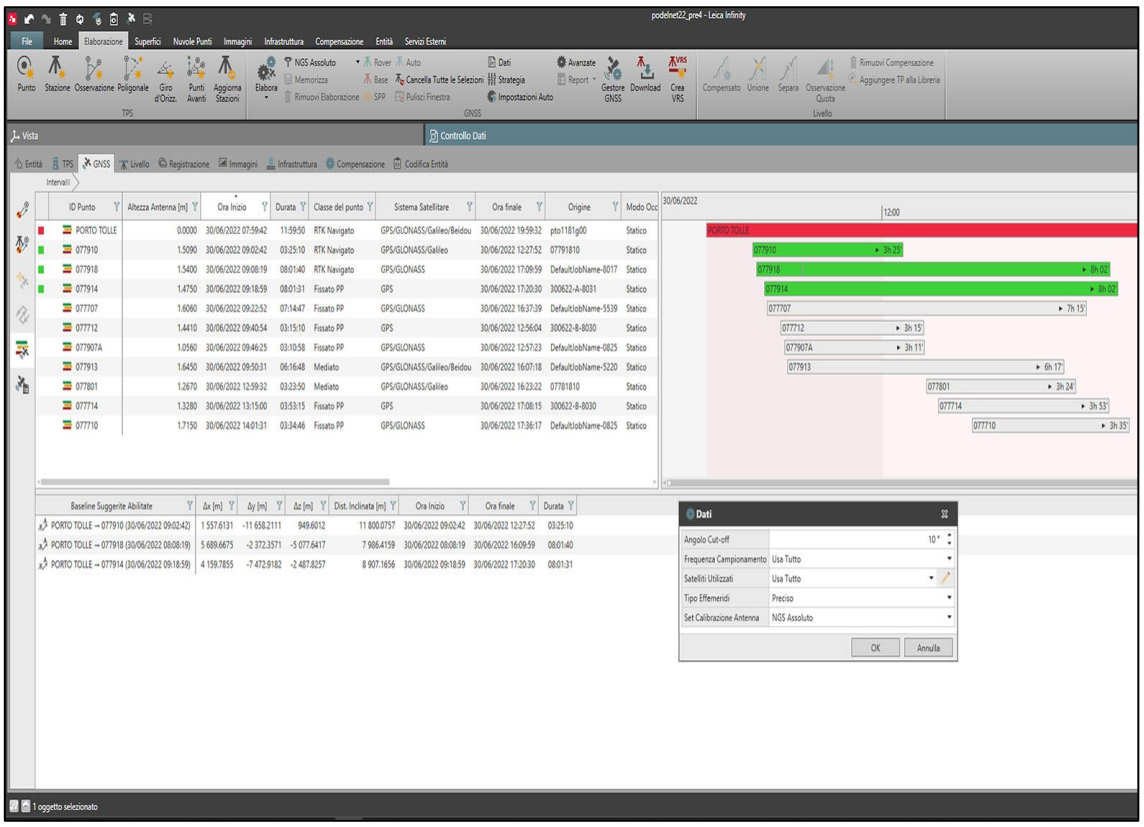


Figura 27: Impostazione dei PARAMETRI DI ELABORAZIONE delle BASELINE

Una volta stabilito il vertice che funge da master e quelli che vengono impostati come rover vengono calcolate le baseline previste nel progetto. In seguito, si procede con il controllo della durata dell'acquisizione simultanea dei due ricevitori che deve essere maggiore delle tre ore previste dal progetto.

Di seguito vengono mostrati alcuni risultati del calcolo di tre basi della rete (Fig.28):

ID Punto	Dalla Stazione	Tipo Soluzione	Sistema Satellitare	Frequenza	Modo Occupazione	Durata	Altezza Antenna [m]	Nome Antenna	Tipo Effemeridi	Dist. Inclinata [m]	DS Dist. Inclinata [m]
077910	PORTO TOLLE	Fissato (Fase)	GPS/GLONASS/Galileo	L1/E1/L2/L5	Statico	03:25:10	1.509	TPSHIPER_	Preciso	11800.2837	0.0001
077918	PORTO TOLLE	Fissato (Fase)	GPS/GLONASS	L1/L2/L5	Statico	08:01:30	1.540	LEIGS15	Preciso	7988.5551	0.0001
077914	PORTO TOLLE	Fissato (Fase)	GPS	L1/L2	Statico	07:56:40	1.475	LEIAX1202	Preciso	8907.6271	0.0001

Figura 28: risultati calcolo basi

Per ciascuna base viene generato un report con riportate le componenti cartesiane del vettore, il suo modulo, chiamato distanza inclinata, e la precisione di calcolo scomposta lungo le tre componenti ed espressa come deviazione standard. Il valore di quest'ultima deve essere contenuto nell'ordine del millimetro, a dimostrazione del fatto che l'elaborazione dei dati è stata condotta in modo adeguato. In caso contrario, bisogna intervenire sulle impostazioni di calcolo analizzando il motivo della mancata convergenza oppure al limite occorre rifare la misura.

Nel caso della PODELNET, non sono stati riscontrati problemi di questo tipo grazie al lungo tempo di permanenza dei ricevitori nei vertici (minimo 3 ore) e alle ridotte lunghezze delle basi (non superiore ai 7 km). Inoltre, è importante specificare che le precisioni non sono relative al valore metrico delle baseline, bensì alla bontà del calcolo statistico che ha coinvolto un gran numero di dati acquisiti e ha presentato una rapida convergenza numerica.

Successivamente, una volta memorizzati i risultati, il software rende disponibile un report dove è possibile osservare i dati inizialmente impostati, le soluzioni ottenute e grafici utili alla comprensione del processo e alla risoluzione di eventuali problemi. È possibile esaminare le altezze delle antenne e i CQ (Quality Ceck), ossia indici di qualità altimetrica (1D), planimetrica (2D) e spaziale (3D) e, anche, i parametri della matrice varianza-covarianza necessari per la successiva fase di compensazione della rete.

Di seguito viene presentato il report del calcolo della baseline PORTO TOLLE – 077910 prodotto dal programma Infinity.

Parametri di Elaborazione (30/06/2022 09:02:42 - 30/06/2022 12:27:52)

Dati	**Selezionato**	**Utilizzato**
Angolo Cut-off:	10°	10°
Frequenza:	Automatico	L1/E1/L2/L5/E5a/E5b
Frequenza Campionamento:	Usa Tutto	10.00 sec
Sistema Satellitare:	GPS/GLONASS/Galileo/Beidou	GPS/GLONASS/Galileo
Tipo Effemeridi:	Preciso	Preciso
Set Calibrazione Antenna:	NGS Assoluto	NGS Assoluto
Strategia Elaborazione		
Tipo Soluzione:	Fissato (Fase)	Fissato (Fase)
Ottimizzazione Soluzione:	Automatico	Nessuno
Frequenza da utilizzare in Iono Minimizzato:	Automatico	Automatico
Modello Troposferico:	VMF con modello GPT2	VMF con modello GPT2
Modello Ionosferico:	Automatico	Calcolato
Permetti Fix Widelane:	Automatico	No
Impostazioni generali		
Min. Distanza per Iono Minimizzato:	15 km	
Fissa Possibili Ambiguità fino a:	300 km	
Durata Min. per Soluzione Float (statico):	00:05:00	
Impostazioni Orario		
Formato Orario:	HH:mm:ss	
Sistema Orario:	Ora Locale	
Leap Seconds:	18	

Risultati Baseline: PORTO TOLLE - 077910

Acquisizione

Ora Inizio - Ora finale:	30/06/2022 09:02:42 - 30/06/2022 12:27:52
Durata:	03:25:10

Antenne

	Base - PORTO TOLLE	Rover - 077910
Nome Ricevitore / SN:	LEICA GR30 / 1706542	TPS B310 / W1K5R1SRUO4
Nome Antenna / SN:	LEIAS10 / 18181012	TPSHIPER_HR / 000
Offset Supporto:	-	-
Lettura Quota:	0.0000 m	1.5090 m
Altezza Antenna:	0.0000 m	1.5090 m

Offset Centro di Fase

	Base - LEIAS10		Rover - TPSHIPER_HR	
GPS	**L1**	**L2**	**L1**	**L2**
Est	0.0014 m	-0.0024 m	-0.0009 m	-0.0004 m
Nord	-0.0010 m	-0.0002 m	0.0010 m	0.0037 m
Altezza	0.0583 m	0.0555 m	0.0947 m	0.0910 m

GLONASS	**L1**	**L2**	**L1**	**L2**
Est	0.0014 m	-0.0024 m	-0.0009 m	-0.0004 m
Nord	-0.0010 m	-0.0002 m	0.0010 m	0.0037 m
Altezza	0.0583 m	0.0555 m	0.0947 m	0.0910 m

Coordinate

	Base - PORTO TOLLE	Rover - 077910		Base - PORTO TOLLE	Rover - 077910
Classe del punto:	RTK Navigato	Fissato PP			
WGS84 Latitudine:	44° 57' 05.45745" N	44° 57' 49.03149" N	Est:	-	-
WGS84 Longitudine:	12° 20' 02.57108" E	12° 11' 07.70237" E	Nord:	-	-
Quota Elliss. WGS84:	49.2837 m	43.3366 m	Quota Orto.:	-	-
WGS84 Cartesiana X:	4 417 074.0256 m	4 418 630.5324 m			
WGS84 Cartesiana Y:	965 827.8320 m	954 169.1040 m			
WGS84 Cartesiana Z:	4 483 571.6582 m	4 484 519.3093 m			

Vettore Baseline e Qualità - WGS84

ΔLatitudine:	0° 00' 43.57405"	DS ΔLatitudine:	0.0001 m
ΔLongitudine:	-0° 08' 54.86871"	DS ΔLongitudine:	0.0001 m
ΔQuota:	-5.9471 m	DS ΔQuota:	0.0003 m
ΔX:	1 556.5068 m	DS ΔX:	0.0002 m
ΔY:	-11 658.7280 m	DS ΔY:	0.0001 m
ΔZ:	947.6511 m	DS ΔZ:	0.0002 m
Dist. Inclinata:	11 800.2837 m	DS Dist. Inclinata:	0.0001 m
M0:	0.4842 m	CQ 1D:	0.0003 m
Q11:	0.00000016	CQ 2D:	0.0002 m
Q12:	0.00000005	CQ 3D:	0.0003 m
Q22:	0.00000006		
Q13:	0.00000012		
Q23:	0.00000005		
Q33:	0.00000019		

Frequenza:	L1/E1/L2/L5/E5a/E5b	GDOP:	1.5 - 3.5	SV GPS:	9/9
Ottimizzazione Soluzione:	Nessuno	PDOP:	1.1 - 2.1	SV GLONASS:	9/9
Tipo Soluzione:	Fissato (Fase)	HDOP:	0.6 - 1.0	SV BeiDou:	-
		VDOP:	0.9 - 1.8	SV Galileo:	5/5
				SV QZSS:	-

3.5 COMPENSAZIONE DELLA RETE: DETERMINAZIONE DELLE COORDINATE FINALI

Una volta esaurita la prima fase dell'elaborazione della rete, costituita dal calcolo delle baseline progettate con i relativi controlli, si può passare alla seconda fase, ovvero alla compensazione della rete. Nella realizzazione della PODELNET, infatti, è stato utilizzato un numero di baseline maggiore di quello strettamente necessario in quanto, per definire le coordinate di n vertici, sarebbero bastate n-1 baseline. Tuttavia, così facendo, non sarebbe possibile ottenere alcuna informazione relativa agli errori di calcolo e quindi alla precisione reale delle misurazioni.

Questa sovrabbondanza di basi, denominata ridondanza, rappresenta il rapporto tra il numero di baseline realmente misurate (N) e quelle strettamente necessarie (n-1) e, come consigliato dall'IGM, deve essere un valore compreso tra due e tre, in modo da avere una quantità di baseline maggiore o uguale al doppio di quella minima. Nel caso in esame la ridondanza (R) si determina tramite la seguente relazione:

$$\boxed{R = \frac{N}{n-1} = \frac{135}{50-1} = 2.755}$$

Grazie alla ridondanza delle baseline è possibile effettuare la compensazione della rete con il metodo delle osservazioni indirette che utilizza la tecnica statistica dei minimi quadrati.

La procedura di compensazione consente di ottenere le coordinate dei vertici nelle tre direzioni (X, Y, Z), accompagnate dalle relative precisioni espresse attraverso gli scarti quadratici medi. Nel medesimo ambiente software, vengono importate inizialmente tutte le baseline calcolate nella prima fase di elaborazione e si accede alla sezione dedicata alla compensazione.

Quest'ultima viene condotta generalmente in duplice maniera, intrinseca e vincolata.

3.5.1 COMPENSAZIONE INTRINSECA O DEI MINIMI VINCOLI

Inizialmente si esegue sempre una compensazione di tipo intrinseco, detta anche ai minimi vincoli, nella quale non vengono fissate le coordinate di nessun vertice e si lascia che il calcolo della compensazione identifichi esso stesso un sistema di riferimento rispetto al quale vengono determinate le coordinate dei vertici e la matrice di varianza e

covarianza contenente le precisioni degli stessi. Di conseguenza, il risultato della compensazione rappresenta la più probabile posizione assunta dai vertici della rete sulla base solamente delle osservazioni effettuate, ovvero delle basi misurate. Il rispetto della tolleranza prefissata, da parte delle precisioni ricavate, equivale quindi alla validazione delle misure eseguite. In una rete fondamentale come la IGM95, misurata con osservazioni statiche a lunga permanenza, si assumono accettabili precisioni massime dei vertici in quota di poco superiori al centimetro.

Il software Infinity contiene una sezione dedicata alla compensazione, dove si possono vedere tutte le osservazioni effettuate permettendo, in caso di necessità, di trascurare quelle che creano problemi. Prima di avviare il processo, inoltre, si deve selezionare il sistema di riferimento, che il programma propone sotto il nome di WGS84, più correttamente definito ETRF2000, ed è possibile eseguire una pre-analisi per rilevare possibili mancanze nella rete.

Per la campagna di misura eseguita dal Laboratorio di Rilevamento e Geomatica nel 2022 la fase di compensazione deve ancora essere conclusa. Riporto di seguito i risultati commentati della procedura di compensazione eseguita per la campagna PODELNET del 2020.

Dopo aver ultimato la compensazione intrinseca, i risultati vengono visualizzati tramite il report finale. Nel riepilogo (Tab.3) si notano il tipo di compensazione, il numero dei vertici e delle baseline calcolate, il numero di iterazioni effettuate per giungere alla convergenza e le stazioni incognite. Inoltre, si possono trovare le coordinate approssimate di partenza (Tab.4) e le osservazioni fatte, ovvero le baseline calcolate in precedenza (Tab.5).

Successivamente si possono trovare i risultati della compensazione, ossia le coordinate geografiche compensate (latitudine, longitudine e quota) di tutti i vertici della rete (Tab.6). I risultati più importanti sono le deviazioni standard (Tab.7) calcolate lungo le due coordinate planimetriche (latitudine e longitudine), espresse in archi e quindi riferite in metri, e lungo la quota. Per validare la campagna, ovvero per verificarne la corretta esecuzione, le coordinate planimetriche devono essere contenute nell'ordine del millimetro, mentre la quota è caratterizzata da deviazioni standard superiori, pari a circa il doppio delle precedenti e nell'ordine del centimetro. Questo è dovuto al fatto che il

sistema satellitare è sbilanciato verso l'alto, ovvero che i punti noti, rappresentati dai satelliti stessi, sono situati a circa 20.000 km dalla superficie terrestre. Vengono riportati degli estratti dei report di calcolo della compensazione intrinseca eseguite nella campagna del 2020.

Tabella 3: riepilogo compensazione intrinseca

Compensazione	
Tipo:	Minimamente Vincolata
Dimensione:	3D
Numero di Iterazioni:	3
Correzione Massima sulle Coordinate nell'ultima iterazione:	4 577.2685 m
Stazioni	
Numero di stazioni note (parzialmente):	1
Numero di stazioni incognite:	48
Totale:	**49**
Osservazioni	
Differenze Coordinate GNSS:	438 (146 baseline)
Coordinate Note:	3
Totale:	**441**
Incognite	
Coordinate:	147
Totale:	**147**
Gradi di Libertà:	**294**
Ottimizzazione criterio v'Pv:	**2 490.29712**
σ a-posteriori:	**2.910**

Tabella 4: estratto coordinate approssimate

Stazione	WGS84 Latitudine	WGS84 Longitudine	Quota Elliss. [m]
065704	45° 00' 37.46" N	12° 06' 07.32" E	40.7442
065705	45° 01' 44.14" N	12° 15' 49.76" E	42.6119
065706	45° 03' 00.79" N	12° 21' 57.72" E	44.3249
…	…	…	…

Tabella 5: estratto delle baseline inserite

Stazione di partenza	Punto Target	ΔX [m]	ΔY [m]	ΔZ [m]	DS ΔX [m]	DS ΔY [m]	DS ΔZ [m]
077906	077718	4312.7285	-737.6350	-4072.2590	0.0021	0.0010	0.0020
065903	065708	3030.7410	-5884.5238	-1699.4227	0.0021	0.0011	0.0021
065909	065706	-1411.4889	4533.6655	415.2460	0.0022	0.0012	0.0022
…	…	…	…	…	…	…	…

Tabella 6: estratto coordinate compensate

Stazione	WGS84 Latitudine	WGS84 Longitudine	Quota Elliss. [m]
065704	45° 00’ 37.46” N	12° 06’ 07.32” E	41.7123
065705	45° 01’ 44.14” N	12° 15’ 49.77” E	43.5880
065706	45° 03’ 00.82” N	12° 21’ 57.74” E	44.6287
065707A	45° 02’ 55.49” N	12° 10’ 41.93” E	43.8287
065708	45° 06’ 34.90” N	12° 14’ 35.01” E	46.7028
065715	45° 03’ 57.22” N	12° 14’ 53.70” E	42.3823
065901	45° 00’ 24.71” N	12° 19’ 42.56” E	52.3720
065903	45° 07’ 52.98” N	12° 19’ 27.57” E	44.7161
065904	45° 05’ 45.44” N	12° 19’ 30.42” E	43.3637
065905	45° 01’ 40.29” N	12° 11’ 17.68” E	53.0648
…	…	…	…

Tabella 7: deviazioni standard delle coordinate compensate

Stazione	DS Lat. WGS84 [m]	DS Long. WGS84 [m]	DS Quota [m]
065704	0.0028	0.0023	0.0058
065705	0.0022	0.0016	0.0044
065706	0.0025	0.0019	0.0052
065707A	0.0025	0.0019	0.0053
065708	0.0026	0.0020	0.0053
065715	0.0021	0.0016	0.0044
065901	0.0020	0.0015	0.0040
065903	0.0024	0.0019	0.0049
065904	0.0023	0.0018	0.0047
065905	0.0020	0.0015	0.0043
065906	0.0022	0.0017	0.0046
065907	0.0020	0.0016	0.0042
065908	0.0021	0.0016	0.0043
065909	0.0022	0.0017	0.0045
077703	0.0028	0.0022	0.0057
077704	0.0027	0.0021	0.0055
077707	0.0022	0.0017	0.0045
077708	0.0030	0.0023	0.0061
077710	0.0025	0.0020	0.0051
077712	0.0014	0.0011	0.0030
077713	0.0018	0.0014	0.0038
077714	0.0017	0.0013	0.0035
077715	0.0021	0.0017	0.0043
077716	0.0023	0.0019	0.0048
077717	0.0027	0.0022	0.0057
077718	0.0030	0.0024	0.0063
077719	0.0021	0.0016	0.0043
077720	0.0027	0.0022	0.0058
077721	0.0024	0.0019	0.0049

077801	0.0029	0.0024	0.0061
077902	0.0022	0.0017	0.0046
077903	0.0014	0.0011	0.0029
077904	0.0019	0.0015	0.0039
077905	0.0052	0.0039	0.0107
077906	0.0024	0.0019	0.0051
077907	0.0026	0.0021	0.0051
077908	0.0023	0.0018	0.0047
077909	0.0019	0.0015	0.0039
077910	0.0018	0.0014	0.0036
077911	0.0021	0.0016	0.0043
077912	0.0026	0.0021	0.0054
077913	0.0032	0.0023	0.0066
077914	0.0022	0.0017	0.0045
077916	0.0025	0.0020	0.0053
077917	0.0018	0.0014	0.0036
077918	0.0023	0.0018	0.0047
CODI	0.0031	0.0025	0.0064
PORTO TOLLE	0.0017	0.0013	0.0035
TGPO	0.0000	0.0000	0.0000

Il report poi prosegue riportando una serie di informazioni di dettaglio sul calcolo di compensazione come le ellissi d'errore Assoluto e Relativo, l'affidabilità esterna, il calcolo delle baseline compensate con i residui rispetto a quelle misurate, vari test e stima degli errori.

3.5.2 COMPENSAZIONE VINCOLATA

Il secondo tipo di compensazione che si esegue è detto vincolato, nel quale si fissano un certo numero di vertici tali da vincolare la rete rispetto ad un sistema di riferimento, in modo da poter confrontare i risultati nel tempo. In questo tipo di compensazione il risultato rappresenta la più probabile mutua posizione assunta dai vertici della rete sulla base delle osservazioni effettuate, cioè delle baseline misurate, e della conoscenza delle coordinate di determinati punti fissi. La rete, infatti, può essere pensata come un corpo rigido che nello spazio è caratterizzato da sei gradi di libertà e che, quindi, per essere fissato necessita di altrettanti vincoli: tre che bloccano le rotazioni attorno agli assi e tre che impediscono le traslazioni rispetto agli assi. Di conseguenza, per rendere fisso un reticolo di basi, generalmente si utilizzano tre vertici. In questo modo, il sistema di riferimento è quello individuato dai tre vertici fissi che, nel caso in esame, sono rappresentati dalle tre stazioni permanenti, le cui coordinate sono state calcolate dal centro di calcolo della rete europea EUREF. Quest'ultimo fornisce infatti un bollettino settimanale nel quale vengono riportate le coordinate calcolate settimanalmente. Nel caso in esame verranno considerati i valori calcolati nella stessa settimana in cui vengono eseguite le misure.

Analogamente a quanto fatto per la compensazione intrinseca, di seguito vengono riportati degli estratti dei report di calcolo della compensazione vincolata eseguita nella campagna del 2020. Le coordinate approssimate e le osservazioni effettuate sono ovviamente identiche a quelle già riportate per la compensazione intrinseca. I risultati che riporto successivamente sono un riepilogo della compensazione vincolata (Tab.8), le coordinate geografiche compensate, di cui si ha un estratto nella Tabella 9, e le relative deviazioni standard contenute nella Tabella 10.

Tabella 8: riepilogo compensazione vincolata

Compensazione	
Tipo:	Vincolato
Dimensione:	3D
Numero di Iterazioni:	1
Correzione Massima sulle Coordinate nell'ultima iterazione:	0.0000 m
Stazioni	
Numero di stazioni note (parzialmente):	3
Numero di stazioni incognite:	46
Totale:	**49**
Osservazioni	
Differenze Coordinate GNSS:	438 (146 baseline)
Coordinate Note:	9
Totale:	**447**
Incognite	
Coordinate:	147
Totale:	**147**
Gradi di Libertà:	**300**
Ottimizzazione criterio v'Pv:	**4 503.64846**

Tabella 9: estratto coordinate compensate

Stazione	WGS84 Latitudine	WGS84 Longitudine	Quota Elliss. [m]
065704	45° 00’ 37.43” N	12° 06’ 07.31” E	41.6609
065705	45° 01’ 44.11” N	12° 15’ 49.75” E	43.5465
065706	45° 03’ 00.80” N	12° 21’ 57.72” E	44.5908
065707A	45° 02’ 55.46” N	12° 10’ 41.91” E	43.7833
065708	45° 06’ 34.87” N	12° 14’ 34.99” E	46.6616
065715	45° 03’ 57.20” N	12° 14’ 53.68” E	42.3411
065901	45° 00’ 24.68” N	12° 19’ 42.54” E	52.3366
065903	45° 07’ 52.95” N	12° 19’ 27.57” E	44.6767
065904	45° 05’ 45.41” N	12° 19’ 30.40” E	43.3241
065905	45° 01’ 40.27” N	12° 11’ 17.66” E	53.0208
…	…	…	…

Tabella 10: deviazioni standard delle coordinate compensate

Stazione	DS Lat WGS84 [m]	DS Long. WGS84 [m]	DS Quota [m]
065704	0.0036	0.0030	0.0075
065705	0.0028	0.0021	0.0056
065706	0.0029	0.0023	0.0061
065707A	0.0032	0.0025	0.0068
065708	0.0032	0.0024	0.0065
065715	0.0026	0.0020	0.0054
065901	0.0020	0.0016	0.0041
065903	0.0028	0.0022	0.0058
065904	0.0027	0.0021	0.0056
065905	0.0026	0.0020	0.0055
065906	0.0023	0.0018	0.0048
065907	0.0020	0.0016	0.0042
065908	0.0019	0.0015	0.0041
065909	0.0025	0.0020	0.0051
077703	0.0031	0.0025	0.0063
077704	0.0028	0.0023	0.0057
077707	0.0026	0.0021	0.0054
077708	0.0035	0.0027	0.0070
077710	0.0028	0.0022	0.0056
077712	0.0017	0.0013	0.0035
077713	0.0013	0.0010	0.0027
077714	0.0018	0.0014	0.0037
077715	0.0020	0.0016	0.0041
077716	0.0024	0.0020	0.0050
077717	0.0031	0.0024	0.0064
077718	0.0035	0.0027	0.0074
077719	0.0019	0.0015	0.0040
077720	0.0030	0.0024	0.0065
077721	0.0025	0.0020	0.0052

077801	0.0026	0.0022	0.0056
077902	0.0022	0.0017	0.0046
077903	0.0015	0.0011	0.0030
077904	0.0014	0.0011	0.0029
077905	0.0066	0.0050	0.0136
077906	0.0025	0.0020	0.0053
077907	0.0030	0.0024	0.0063
077908	0.0023	0.0018	0.0048
077909	0.0014	0.0012	0.0031
077910	0.0022	0.0017	0.0046
077911	0.0019	0.0015	0.0040
077912	0.0027	0.0022	0.0056
077913	0.0037	0.0027	0.0079
077914	0.0026	0.0020	0.0052
077916	0.0028	0.0022	0.0058
077917	0.0023	0.0018	0.0047
077918	0.0024	0.0020	0.0050
CODI	0.0000	0.0000	0.0000
PORTO TOLLE	0.0000	0.0000	0.0000
TGPO	0.0000	0.0000	0.0000

3.6 VALIDAZIONE DELLA CAMPAGNA DI MISURA

Come citato nel sotto-capitolo 3.5.1, la validazione della campagna di misura, ovvero la verifica della corretta esecuzione, avviene tramite il rispetto della tolleranza prefissata da parte delle precisioni ricavate nella compensazione intrinseca. In una rete fondamentale come la IGM95, misurata con osservazioni statiche a lunga permanenza, si assumono usualmente i seguenti limiti sulle deviazioni standard ottenute nella compensazione intrinseca: qualche millimetro per le coordinate planimetriche e attorno al centimetro per la quota ellissoidica.

Osservando i risultati, tutti i vertici che compongono la rete rispettano tali condizioni, ad eccezione del numero 077905 in quanto caratterizzato da un errore di 1.07 cm in quota, un valore limite che, tuttavia, non crea problemi. Questo punto presenta una deviazione standard pari a circa il doppio della media delle altre in quanto è situato in una posizione che non gode di una buona ricezione satellitare. Per quanto riguarda le stazioni permanenti, solamente quella disposta a Taglio di Po presenta deviazioni standard nulle, essendo questo il punto baricentrico scelto dal software come unico vincolo della compensazione intrinseca.

4. CONCLUSIONI

L'obiettivo di questo elaborato era lo studio delle metodologie di misura e delle strategie di elaborazione dei dati acquisiti relativi ad una rete geodetica di riferimento, nell'area del delta del Po, una zona alquanto fragile e da sempre sensibile alle variazioni altimetriche dovute principalmente al fenomeno della subsidenza.

Mediante l'impiego del posizionamento statico relativo a lunga permanenza si è resa possibile l'acquisizione di dati GNSS e la successiva elaborazione al fine di determinare la differenza tra le coordinate tra i vertici della rete, con un grado di accuratezza inferiore al cm, precisione richiesta nel calcolo della rete PODELNET.

Il progetto della rete, eseguito con la collaborazione dell'IGM, è stato impostato in modo tale da costituire un raffittimento a 7 km della rete geodetica fondamentale italiana IGM95. Proprio secondo le direttive imposte dall'IGM, la PODELNET ha previsto l'inclusione dei vertici preesistenti e delle tre stazioni permanenti presenti nell'area. Inoltre, la posizione dei vertici è stata programmata per garantire un'ottimale ricezione dei segnali trasmessi dalle costellazioni GNSS.

Durante l'acquisizione i ricevitori sono stati impostati con i parametri prescritti ed il posizionamento degli stessi è stato programmato in modo tale da consentire l'acquisizione simultanea dei dati con permanenza maggiore o uguale alle tre ore per ognuna delle baseline previste.

I dati acquisiti, una volta eseguiti tutti i controlli previsti per evitare gli errori grossolani, sono stati importati nel software Infinity per l'elaborazione della rete che prevede una prima fase consistente nel calcolo delle baseline.

Nello stesso ambiente Infinity si è poi proceduto con la seconda fase dell'elaborazione, ovvero la compensazione delle misure al fine di ottenere le coordinate dei vertici nelle tre direzioni (X, Y, Z) accompagnate dalle relative precisioni reali fornite attraverso gli scarti quadratici medi. Tramite quest'ultime si è resa possibile la validazione della campagna di misura attraverso verifiche di tolleranza nei risultati ottenuti nella compensazione di tipo intrinseco.

L'ultima procedura eseguita è stata quella del calcolo delle coordinate finali della PODELNET attraverso la compensazione di tipo vincolato. Questo ha permesso di uniformare il sistema di riferimento e di creare il data-base necessario per il

monitoraggio delle deformazioni superficiali dell'area attraverso il confronto delle coordinate finali calcolate successivamente alle campagne di misura biennali.

BIBLIOGRAFIA

CENNI N., FABRIS M., FIASCHI S., FLORIS M., MENIN A., MONEGO M., RICCARDI P., “Integrazione di dati SAR e GNSS per lo studio della subsidenza nel Delta del Po”, (2018)

MANCINI Francesco, “Topografia e tecniche di rilevamento”, <Topo-e-tecniche-di-rilevamento.pdf>, (2013)

CARBOGNIN L, MAZZUCCATO A, STROZZI T, TEATINI P, TOSI L, VITTURI A, “Subsidenza”, <Subsidenza.pdf (earth-prints.org)>

MENIN Andrea, “Dispense del corso di Topografia e Cartografia”, (2021)

SITOGRAFIA

1.

“Subsidenza”, in «Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale», <https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/suolo-e-territorio/rischio-ad-evoluzione-lenta/subsidenza>

2.

“La subsidenza e l'eustatismo”, in «Città di Venezia», <https://www.comune.venezia.it/it/content/la-subsidenza-e-leustatismo>, (25/03/2022)

3.

“Il Delta del Po”, in «Consorzio di Bonifica Delta del Po», <https://www.bonificadeltadelpo.it/02-header-menu/la-storia-del-territorio/la-formazionedeldelta-del-po/> (03/10/2021)

4.

EL ASSIR Rachid, “Sistemi globali di navigazione satellitare”, in «StrumentazioneElettronica.it», <https://www.strumentazioneelettronica.it/tecnologie/wireless/sistemi-globali-dinavigazionesatellitare-20120719926/?showall=1>, (19/07/2012)

5.

Tiso V,” GLONASS cos’è e come funziona: Approfondimento”, in «OutOfBit», < https://www.outofbit.it/glonass-cose-funziona-approfondimento/>, (06/05/21)

6.

” Tecniche di posizionamento GNSS”, in «UmbriaGeo», <http://umbriageo.regione.umbria.it/pagine/tecniche-di-posizionamento-gnss>, (24/04/2013)

7.

” Rete IGM95”, in «Rete IGM95 - IGM E-Commerce Site» <https://www.igmi.org/it/descrizione-prodotti/elementi-geodetici-1/rete-igm95>, (23/11/2016)

8.

CORRADEGHINI Paolo, “Che cosa devi sapere per usare un gps di precisione”, in «3DMETRICA», <https://3dmetrica.it/gps-nel-rilievo-topografico/>, (24/11/2017).

9.

National Geodetic Survey, <https://www.ngs.noaa.gov/CORS/Gpscal.shtml>, (06/01/21)