

## Compensazione di reti topografiche integrate a supporto di misure di gravità

Lorenzo Rossi (\*), Daniele Sampietro (\*\*), Carla Braitenberg (\*\*\*), David Zuliani (\*\*\*\*)

(\*) Politecnico di Milano, DICA Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano, Italia,  
tel. 02 23996505, email [lorenzo1.rossi@polimi.it](mailto:lorenzo1.rossi@polimi.it)

(\*\*) GReD, via Valleggio 11 22100 Como, Italia, tel. 031 3327522, email [daniele.sampietro@g-red.eu](mailto:daniele.sampietro@g-red.eu)

(\*\*\*) Università di Trieste, Dipartimento di Matematica e Geoscienze, Trieste, Italia, tel: 040 5582257,  
email: [berg@units.it](mailto:berg@units.it)

(\*\*\*\*) Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, Via Treviso 55, 3100 Udine, Italia,  
email: [dzuliani@inogs.it](mailto:dzuliani@inogs.it)

### Sommario

L'uso di tecniche di compensazione che combinino misure topografiche classiche ed osservazioni GNSS all'interno della stessa rete facilita il rilievo di punti sparsi su ampie superfici garantendo un'elevata accuratezza ed una maggiore precisione della stessa. Tra le possibili applicazioni che possono beneficiare di questa combinazione c'è il rilievo per l'inquadramento di misure di gravità a terra, che tipicamente richiedono un posizionamento di precisione, soprattutto in quota dove gli errori devono essere contenuti in pochi centimetri. In questo lavoro presentiamo un esempio di compensazione ai minimi quadrati di osservazioni topografiche classiche e GNSS necessarie all'appoggio della rete gravimetrica per lo studio della grotta Gigante a Trieste, effettuata con il software GeoNet sviluppato da Politecnico di Milano e GReD s.r.l. Il software permette la compensazione rigorosa delle osservazioni direttamente in un sistema di riferimento ellissoidico. In particolare sono stati osservati circa 80 punti su una superficie di 20000 m<sup>2</sup> integrando le seguenti tecniche:

- GPS RTK con il servizio di posizionamento fornito della rete FReDNet gestita dall'OGS;
- GPS statico rapido e successivo post-processamento con il metodo differenze doppie rispetto a stazioni permanenti, con osservazioni di 15 minuti per punto.
- Stazione totale.

Il campo di gravità, acquisito con un gravimetro Lacoste&Romberg mod. D, permette di rilevare molto bene sia la presenza che la forma della grotta Gigante. L'esperimento mostra come la combinazione di sistemi GPS e strumenti classici sia una soluzione ottimale per questo tipo di problemi, permettendo di evitare grandi reti topografiche classiche, superando i problemi di scarsa visibilità del cielo del sistema GPS e fornendo risultati di elevata precisione (deviazioni standard di 15 mm in quota). Inoltre i risultati ottenuti dall'osservazione del campo di gravità mostrano come una copertura sistematica del Carso potrebbe servire per la determinazione di tutte le maggiori grotte esistenti con grande impatto in applicazioni civili e ambientali, dato che consentirebbe la pianificazione dello sviluppo urbanistico a distanza di sicurezza dalle grotte del sottosuolo.

### Abstract

The integration of classical (total station and levelling) and GNSS topographic observations allows the survey of scattered points over large areas with high accuracy and precision. Among the possible applications of this technique there are ground gravity surveys. In fact this kind of survey requires the positioning of scattered points with high precision, especially in the vertical coordinate where precision of the order of better than a few centimeters is necessary. In this work we present an example of least squares adjustment of a GNSS and classical topographic network used to

position the gravity network for the study of the natural cave Grotta Gigante near Trieste. The solution has been computed by means of the software GeoNet, developed by Politecnico di Milano and GREd s.r.l., which is able to perform a rigorous integrated adjustment, directly in an ellipsoidal reference frame. In particular, we observed about 80 points on a surface of 20000 m<sup>2</sup> with the following techniques:

- GPS RTK, using the positioning network FreDNet managed by OGS;
- Rapid GPS static observation (15 minutes) and double differences post-processing;
- Total station.

The gravity field observed with a Lacoste & Romberg mod. D gravimeter allows to detect very well not only the presence but also the shape of the Grotta Gigante cave. The experiment shows how the combination of GPS systems and classical instruments is an optimal solution for this type of problem, thus avoiding large classical topographic networks, overcoming the problems of poor sky visibility of the GPS system and providing results of high precision (standard deviations 15 mm in height coordinates). Furthermore, the result obtained by the observation of the gravity field shows how a systematic coverage of the Karst would have the benefit to recover the position of all of the greater existing caves. This will have a large impact on civil and environmental purposes, since it will allow to plan the urban development at a safety distance from subsurface caves.

### Introduzione

L'osservazione del campo gravitazionale terrestre permette di ottenere informazioni sulle variazioni di massa nel sottosuolo. Questi effetti, legati a corpi locali (come una grotta), sono però "nascosti" dal segnale gravitazionale delle masse dell'intero pianeta. Quindi, per poterli identificare, è necessario rimuovere dalle osservazioni gli effetti dovuti alle masse note, legati principalmente alla topografia, ed andare ad isolare un segnale residuo dell'ordine di  $10^{-5}$ ~ $10^{-6}$  m/s<sup>2</sup> (Figura 1) dovuto alla differenza (o contrasto) di densità rispetto ad un valore standard assunto per la topografia.



Figura 1 – principali componenti del segnale di gravità e relativo ordine di grandezza

Il gravimetro a molla, il cui schema è visibile in Figura 2, rende possibile l'osservazione del campo di gravità a terra con accuratze dell'ordine di 0.001 mGal ( $10^{-8}$  m/s<sup>2</sup>), permettendo quindi di identificare non solo la presenza, ma anche le dimensioni e la forma di eventuali anomalie di massa nel sottosuolo.

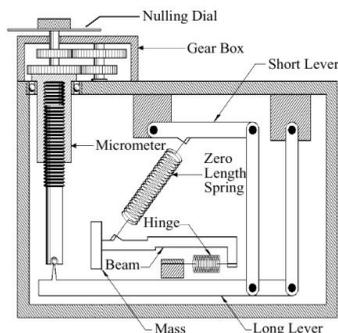


Figura 2 – Schema di funzionamento di un gravimetro a molla del tipo Lacoste & Romberg.

Allontanandosi dalla topografia in aria libera (*free-air reduction*) la variazione del campo gravitazionale è di circa 0.3 mGal/m (Hofmann-Wellenhof, Moritz, 2005). Per poter sfruttare appieno l'elevata sensibilità del gravimetro è necessario posizionare in quota i punti di osservazione con una precisione almeno centimetrica.

Si pone quindi il problema di quale sia il metodo di rilievo più adatto a garantire queste precisioni. Una soluzione è quella di integrare strumenti GNSS e strumenti topografici classici (stazione totale) così da evitare reti topografiche troppo complesse (che portano al degrado della precisione) ed i problemi di visibilità del cielo tipici del GPS in presenza di ostacoli (e.g. vegetazione o edifici). Per integrarli correttamente si è scelto di ricorrere al *software* GeoNet che permette la compensazione di una rete integrata tridimensionale direttamente in un sistema di riferimento globale.

In questo lavoro presentiamo un esempio di applicazione di questa metodologia al rilievo gravimetrico della Grotta Gigante vicino a Trieste. In particolare nei prossimi paragrafi esamineremo il funzionamento del *software* GeoNet e successivamente descriveremo l'esempio di compensazione della rete di appoggio al rilievo gravimetrico eseguito nell'area sovrastante la grotta.

### GeoNet

GeoNet è un *software* sviluppato da Politecnico di Milano e GRd s.r.l. (Rossi et al., 2012, Rossi, 2011) per eseguire la compensazione rigorosa ai minimi quadrati di reti topografiche tridimensionali integrate. È in grado di processare reti con osservazioni di angoli azimutali, zenitali, distanze, dislivelli ed osservazioni GPS (fornite come coordinate globali o *baseline* con le relative matrici di varianza-covarianza) lavorando direttamente in un sistema di riferimento geodetico globale (i.e. latitudine, longitudine ed altezza ellissoidica). Inoltre, integra diversi modelli di geoidi come ad esempio EGM08 (Pavlis et al., 2012) o Italgeo2005 (Barzaghi et al., 2007) da cui sono ricavati i valori di deviazione della verticale e di ondulatione del geoidi, necessari per la corretta integrazione di osservazioni satellitari e classiche della topografia.

Il *software* e la relativa interfaccia grafica (Figura 3) per importare e gestire osservazioni, coordinate approssimate e risultati sono stati sviluppati in ambiente MatLab. In particolare GeoNet è in grado di importare le osservazioni direttamente dai file generati da vari strumenti topografici oltre che in formato testuale ASCII.

Il *software* può essere concettualmente diviso in tre moduli principali: il primo permette di importare e gestire le osservazioni, fissare il sistema di riferimento e calcolare le coordinate approssimate dei punti; il secondo esegue la compensazione vera e propria; mentre il terzo può essere usato per analizzare i risultati, calcolando diversi indici statistici per ricercare la presenza di eventuali outlier. In particolare vengono eseguiti il test globale sul modello o test del  $\chi^2$ , i test locali sulle singole osservazioni (Sansò, 1987) e vengono calcolate la ridondanza locale delle osservazioni oltre che l'affidabilità interna ed esterna (Biagi, 2009).

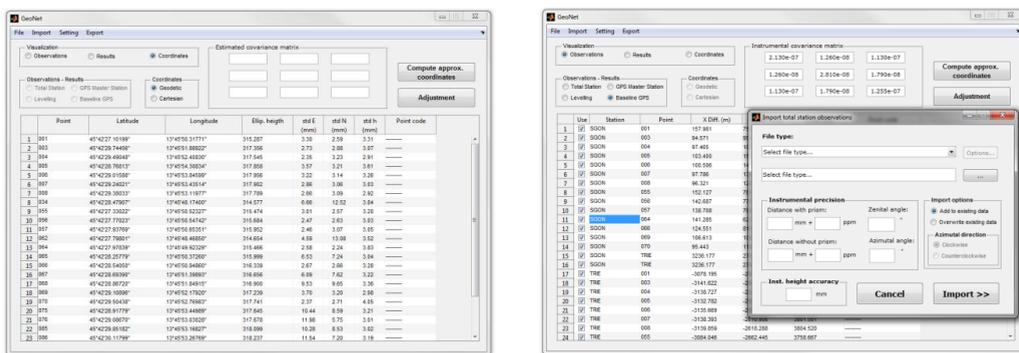


Figura 3 – Interfaccia grafica di GeoNet.

## Il rilievo gravimetrico della Grotta Gigante a Sgonico (TS)

La presenza di cavità sotterranee ha un impatto rilevante in applicazioni civili: infatti deve essere considerata in fase di progettazione e rappresenta un potenziale pericolo per eventuali manufatti sussistenti. Questo tipo di problema è particolarmente rilevante nelle zone carsiche, dove nelle rocce calcaree, solubili dagli agenti atmosferici, sono presenti migliaia di grotte e cavità di varie dimensioni spesso sconosciute. Ad esempio è recente la scoperta di una grotta, chiamata in seguito Grotta Impossibile (Torelli e Guidi, 2005), durante la costruzione di una galleria autostradale nel carso triestino avvenuta solamente nel 2004.

In questo lavoro mostriamo come sia possibile, partendo da misure di gravità a terra, identificare la presenza e l'estensione di eventuali cavità. Come area test è stata scelta la Grotta Gigante (Tenze et al., 2011) a Sgonico (TS), trattandosi di una grotta la cui posizione e forma sono ben conosciute. Essa viene studiata a partire dal 1800 dato che contiene la sala naturale più grande al mondo: una cavità alta 98 m, lunga 107 m e larga 70 m. Inoltre all'interno della Grotta Gigante è situata una stazione geofisica composta da pendoli geodetici orizzontali installati in occasione dell'Anno Internazionale della Geofisica nel 1959 da Antonio Marussi (Marussi, 1960) allo scopo di registrare tutte le deformazioni alle quali è sottoposto il substrato roccioso ed in particolare per lo studio delle maree terrestri.

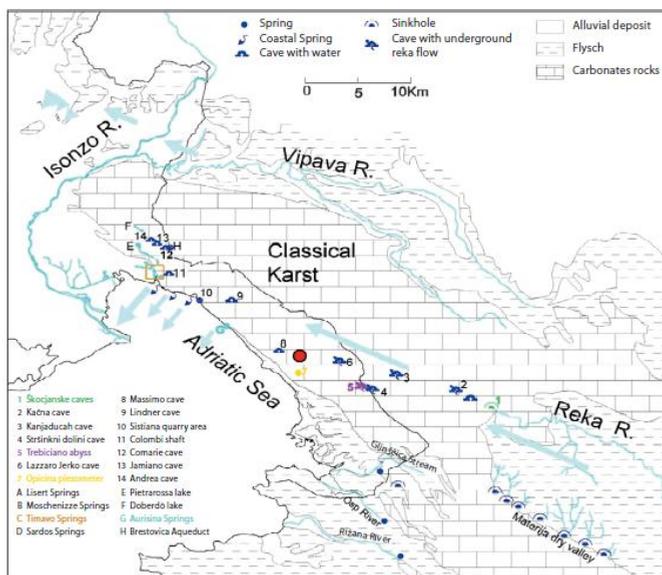


Figura 4 – Carta della zona del carso triestino dove in rosso è indicata la posizione della Grotta Gigante (Tenze et al., 2012).

Sull'area sovrastante la grotta è stata realizzata una rete gravimetrica di circa 80 punti per un'estensione di 20000 m<sup>2</sup> (Figura 6). La posizione di ogni stazione è stata misurata con almeno una delle seguenti tecniche:

- GPS statico di circa 15 minuti e successivo post processamento con il metodo delle differenze doppie, usando la stazione permanente di Sgonico della rete FRedNet (Battaglia et al., 2003) e quella di Trieste appartenente alla rete "A. Marussi";
- GPS RTK usando il servizio di posizionamento fornito dalla rete FRedNet, osservando 3 posizioni per punto;
- Stazione Totale per i punti nei quali non ci fosse sufficiente visibilità del cielo, compensate con GeoNet così da integrare questi punti direttamente nel sistema di riferimento globale del GPS.

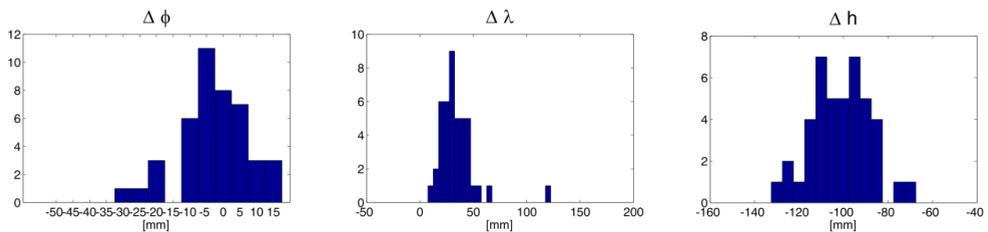


Figura 5 – Istogrammi della differenza di posizione ottenuta confrontando osservazioni GPS RTK e GPS statico.

Sui punti misurati con il GPS sia nella modalità statico che in RTK è stato possibile eseguire alcune statistiche (Figura 5) che evidenziano come la precisione d'osservazione sia sufficiente rispetto a quanto richiesto dall'applicazione. Infatti tale precisione risulta essere compresa tra qualche millimetro e qualche centimetro, secondo quanto richiesto dalla sensibilità del gravimetro.

Il segnale gravimetrico della Grotta Gigante in termini di anomalia *free-air* (Figura 6), mostrando un segnale complessivo di circa 1.5 mGal, permette non solo di identificarne la presenza, ma anche di individuare la forma della cavità.

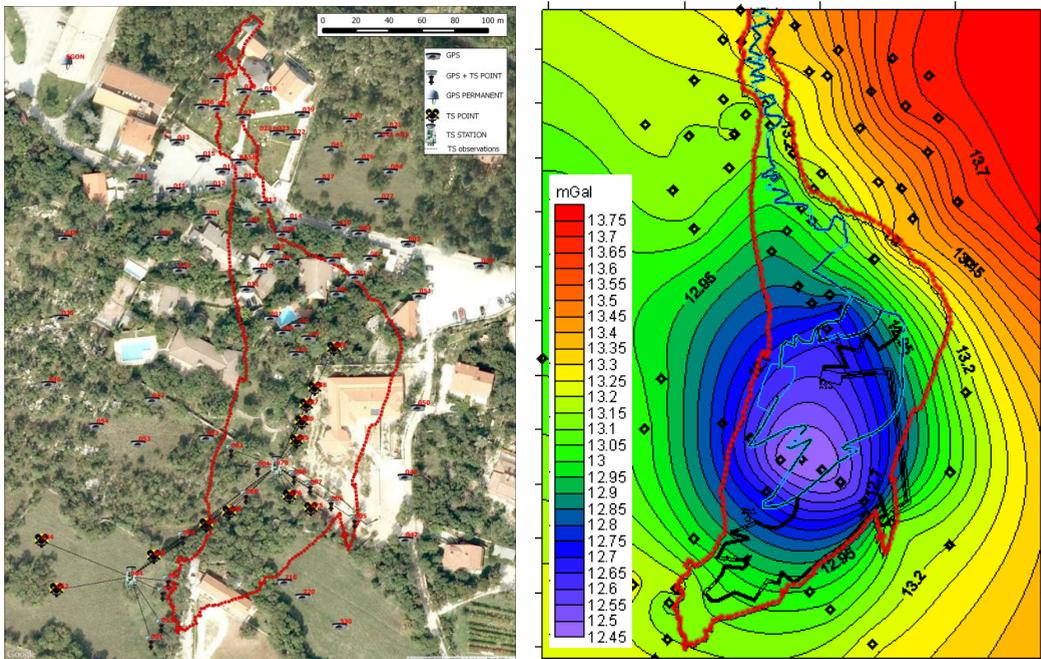


Figura 6 – Mappa dei punti osservati con relativa tecnica di misura della posizione (a sinistra) e mappa del segnale gravimetrico *free-air* (a destra). In rosso è evidenziata la posizione della grotta.

## Conclusioni

L'esperimento eseguito in questo lavoro è volto alla stima delle posizioni al fine di inquadrare una rete gravimetrica. Il metodo di rilievo usato per la stima delle posizioni si è rivelato adatto allo scopo, garantendo l'accuratezza richiesta per l'appoggio della rete gravimetrica (al massimo qualche centimetro). L'esperimento ha verificato la possibilità di usare anche solo un *rover* in modalità RTK per l'appoggio della rete gravimetrica, dato che questa modalità garantisce la precisione richiesta. Inoltre la possibilità di integrare osservazioni di topografia classica (stazione

totale e/o livellazione) con il GPS permette l'osservazione della posizione anche per i punti dove la visibilità del cielo non sia ottimale.

La grotta, mostrando un segnale di gravità di ampiezza 1.5 mGal, è chiaramente identificabile ed i risultati mostrano come una copertura sistematica del Carso potrebbe servire per la determinazione di tutte le maggiori grotte esistenti con grande impatto in applicazioni civili e ambientali, dato che consentirebbe la pianificazione dello sviluppo urbanistico a distanza di sicurezza dalle grotte del sottosuolo.

### **Bibliografia**

Barzaghi R, Borghi A, Carrion D, Sona G (2007), "Refining the estimate of the Italian quasigeoid", *Bollettino di Geodesia e Scienze Affini*, 66.3: 145-160.

Battaglia M, Zuliani D, Pascutti D, Michelini A, Marson I, Murray MH, Burgmann R (2003), "Network Assesses Earthquake Potential in Italy's Southern Alps", *EOS*, 84 (28):262-264.

Biagi L (2009), *I fondamentali del GPS*, Geomatics Workbooks, 8.

Hofmann-Wellenhof B, Moritz H (2005), *Physical geodesy*, Springer.

Marussi A (1960), The University of Trieste station for the study of the tides of the vertical in the Grotta Gigante. *Proceedings of the Third International Symposium on Earth Tides, Trieste*, 45-52.

Pavlis NK, Holmes SA, Kenyon SC, Factor JK (2012), The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008), *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012)*, 117(B4).

Rossi L, Sampietro D, Sansò F (2012), "Geonet: un software per la compensazione di reti topografiche integrate", *atti 16a conferenza nazionale Asita, 6-9 novembre 2012, Vicenza*, 1157-1164.

Rossi L (2011), *GeoNet: un software per la compensazione di reti topografiche integrate tridimensionali*, Tesi di laurea, Politecnico di Milano, Como.

Sansò F (1996), *La verifica di ipotesi*, Cittàstudi, Milano.

Tenze D, Braitenberg C, Nagy I, Cucchi F (2011), "Deformazioni indotte da flussi idrici carsici nel carso triestino", *Atti e Memorie della Commissione Grotte "E. Boegan"*, 43:41-55.

Tenze D, Braitenberg C, Nagy I (2012), Karst deformations due to environmental factors: evidences from the horizontal pendulums of Grotta Gigante, Italy. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 53:331-345, doi:10.4430/bgta0049

Torelli L, Guidi P (2005), La Grotta Impossibile e i lavori per la grande viabilità triestina, *Speleologia, a. XXVI*, 52:12-21.