

Mareometria e GNSS*

GNSS and mareometer

DOMENICO SGUERSO, BARBARA BETTI, MAURIZIO DEMARTE,
BIANCA FEDERICI, MARCO PIEROZZI, LUIGI SINAPI

Università di Genova; domenico.sguerso@unige.it

Politecnico di Milano; barbara.betti@polimi.it

Istituto Idrografico della Marina – Genova; maurizio.demarte@marina.difesa.it

Università di Genova; bianca.federici@unige.it

Istituto Idrografico della Marina – Genova; marco_pierozzi@marina.difesa.it

Istituto Idrografico della Marina – Genova; luigi.sinapi@marina.difesa.it

Riassunto

La conoscenza della Terra non può prescindere dall'impiego di un riferimento altimetrico connesso al campo di gravità, sia per le applicazioni scientifiche che tecniche.

Tradizionalmente la quota associata a un generico punto è riferita al livello medio del mare e, in Italia, l'Ente competente per l'osservazione e il monitoraggio di tale livello è l'Istituto Idrografico della Marina (IIM; DPR 90/2010). Internazionalmente oggi si privilegia però la scelta di assumere come riferimento per le altezze il geoide globale, ossia quella particolare superficie equipotenziale del campo di gravità convenzionalmente scelta dalla International Association of Geodesy (IAG). In Italia è pertanto necessario un ammodernamento infrastrutturale e procedurale con integrazione dell'infrastruttura mareometrica con Stazioni Permanenti per il posizionamento GNSS. Sarà così possibile uniformare il Datum di Altezza nazionale a quello globale, quale riferimento tempo-variante delle quote ortometriche depurato da effetti geodinamici.

Si attendono positive ricadute per la stima del geoide gravimetrico, così come per il controllo della linea di costa e lo studio delle correnti stazionarie, con un potenziale accrescimento della conoscenza del dato climatologico.

Parole chiave

Mareometro, GNSS, Geoide, Datum Altimetrico Internazionale

Abstract

The knowledge of the territory cannot be obtained without the use of a height reference frame connected to the gravity field, both for scientific and technical applications.

Traditionally, the height associated to a point whichever is referred to the mean sea level and, in Italy, the Institution in charge to measure and monitor of such a sea level is the Italian Navy Hydrographic Institute (IIM; DPR 90/2010). However, internationally the global geoid is commonly adopted as a reference for the height, i.e., that particular equipotential surface of the gravity field which is conventionally adopted by the International Association of Geodesy (IAG). Therefore, in Italy an infrastructural and procedural modernization is necessary through the integration of the mareometric infrastructure with Permanent Stations for GNSS positioning. Thus it will be possible to uniform the national Height Datum to the global one, as a time-dependent reference frame of orthometric heights which is made free from geodynamical effects.

Positive consequences are expected for the gravimetric geoid estimation and for the coastline control and the study of stationary currents as well, with a potential increase in the knowledge of climatological data.

Keywords

Mareometer, GNSS, Geoid, International Altimetric Datum

* Si ringrazia la dott.ssa Vittoria Vassallo per il contributo fornito con il lavoro di tesi triennale in Ingegneria Civile e Ambientale dal titolo «Analisi di qualità di osservazioni GPS per la realizzazione di una stazione permanente a supporto del mareometro I.I.M. di Genova» sviluppata con due dei co-autori del presente contributo, in qualità di relatori.

La conoscenza della Terra non può prescindere dall'impiego di un riferimento altimetrico connesso al campo di gravità, sia per le applicazioni scientifiche che per quelle tecniche. La comprensione del territorio e della sua evoluzione nel tempo è di primaria importanza per operarvi, sia in fase di progettazione che di esecuzione e di verifica degli interventi, siano essi di carattere costruttivo che infrastrutturali, come per quelli sul territorio e per l'ambiente. Le operazioni di rilevamento e di monitoraggio devono essere opportunamente inquadrare per poter attribuire coordinate ai punti di interesse da riferirsi perciò ad un comune Sistema di Riferimento (SR).

Un SR può essere definito attraverso la scelta a priori di opportune coordinate di alcuni punti, di modo da bloccare i cosiddetti gradi di libertà lasciati liberi dalle misure che collegano i punti di interesse, ossia di quanto prende il nome di rete topografica o geodetica. Tale definizione, che in inglese viene chiamata *Reference System*, deve però essere concretizzata o meglio realizzata sul territorio attraverso la materializzazione dei punti scelti. L'aggiunta di eventuali informazioni rispetto al numero strettamente necessario rappresentato dai gradi di libertà (come ad esempio l'inserimento di un nuovo punto o di una nuova misura), richiede però che queste siano coerenti con le assunzioni effettuate, rendendo pertanto necessarie campagne di misura. L'insieme di informazioni scelte, la loro materializzazione e lo svolgimento di campagne di misura, portano perciò alla cosiddetta *realizzazione del Sistema di Riferimento*, detto Datum o, in inglese, *Reference Frame*. La Definizione e la Realizzazione del SR sono due processi molto diversi, la prima segue regole e scelte effettuate a priori, 'a tavolino', mentre la seconda richiede campagne di misure da effettuarsi sul territorio.

La realizzazione di un SR non può essere effettuata una volta per tutte, in quanto la dinamica terrestre, dovuta ad innumerevoli fenomeni anche di carattere locale, influenza la posizione dei vertici che materializzano la realizzazione del SR e che, di conseguenza, varia di continuo; è perciò necessaria una sistematica ripetizione di tali campagne di misura (monitoraggio) con un periodico ricalcolo delle coordinate dei punti e della loro velocità di spostamento, con il riferimento al periodo di realizzazione.

L'IGS (International GNSS Service for Geodynamics), contribuisce con ben 350 Stazioni Permanenti (SP), alla realizzazione dei SR mondiali, permettendo il monitoraggio delle deformazioni crostali. La rete IGS rende quindi possibile una realizzazione dinamica del Datum, attraverso il catalogo di coordinate e di velocità di spostamento dei punti che la costituiscono, che permettono di giungere ad una valutazione dei modelli rappresentativi delle deformazioni globali.

L'inquadramento dell'evoluzione della realtà, riferito all'epoca dell'intera campagna di misura, dovrebbe pertanto essere utilizzato da qualsiasi applicazione che si leghi alla conoscenza del territorio, sia per scopi topografici o cartografici, oltre che per quelli di carattere geodinamico. Nella pratica ciò non accade, le velocità sono spesso comuni a porzioni di territorio con deformazioni relative trascurabili e questo, vista anche la complessità delle operazioni di misura e di elaborazione, spesso porta ad adottare una 'rete statica', aggiornata solo dopo diversi anni.

In Italia la cosiddetta Rete Dinamica Nazionale (RDN), detta rete di ordine zero, ha permesso la realizzazione del nuovo Sistema di Riferimento nazionale ETRF2000-2008.0, introdotto nel 2011 dal DPCM 10.11.2011, inquadrando il nuovo SR in quello europeo ETRF definito mediante campagne di misura relative al 2000, le cui coordinate sono state portate attraverso modellazione matematica al primo gennaio del 2008.

Sebbene tali reti rappresentino la realizzazione di SR tridimensionali o 3D, vengono però adottate come struttura portante di SR planimetrici; da un punto di vista altimetrico, infatti, molteplici possono essere i sistemi di riferimento, ma la conoscenza della Terra non può prescindere dall'impiego di un riferimento altimetrico connesso al campo di gravità, sia per le applicazioni scientifiche che tecniche: basti pensare alla determinazione delle orbite dei satelliti artificiali o alla valutazione del deflusso delle acque.

Tradizionalmente la quota associata a un generico punto è riferita al livello medio del mare e, in Italia, l'Ente competente per l'osservazione di tale livello è l'Istituto Idrografico della Marina (IIM; DPR 90/2010 di cui all'art. 222 «esegue, nell'ambito delle funzioni di responsabile nazionale della definizione del livello medio mare, i rilievi mareometrici necessari alle esigenze idro-

grafiche e riceve le misure mareometriche eseguite nelle acque di giurisdizione nazionale»). Il mareometro principale della rete IIM è attivo dal 1883 presso il Ponte Morosini a Genova e dal 1943 rappresenta il riferimento altimetrico nazionale.

La scelta internazionale, però, è quella di assumere come riferimento per le altezze una particolare superficie equipotenziale del campo di gravità, detta geoide (globale), scelta convenzionalmente dalla International Association of Geodesy (IAG): la distanza di un punto dal geoide, lungo la direzione della verticale, è detta quota ortometrica. La stima del geoide viene validata dall'International Geoid Service (Servizio Internazionale del Geoide), organismo ufficiale della IAG con sede a Milano.

Il geoide globale e la superficie del livello medio del mare locale sono prossimi tra loro, ma con differenze in generale non trascurabili. Il valore di potenziale W_G della superficie equipotenziale passante per il punto fisico rappresentante l'origine delle quote, Genova come si è anticipato per l'Italia, in generale non coincide con il valore W_0 (potenziale di riferimento del geoide globale). Lo 'zero' assunto dal riferimento nazionale sarà pertanto differente da quello assunto a livello internazionale:

$$H(\text{ita}) = 0 \neq H(\text{int}) = 0$$

$$W_G \neq W_0$$

Questo scostamento è valutabile con mezzi propri della geodesia, a partire da misure del campo di gravità e dalla misura dell'altezza ellissoidica del mareometro da associare a quelle effettuate dal mareometro stesso. Per ottenere ciò è pertanto necessario integrare l'infrastruttura mareometrica con Stazioni Permanenti (SP) per il posizionamento GNSS che permettano di ottenere con estrema precisione l'altezza ellissoidica (correlabile con il geoide globale), ognuna posta nelle vicinanze di un mareometro, periodicamente connesse al mareometro stesso mediante livellazione di elevata precisione. Questa associazione, tra rilievo mareometrico e GNSS, permette tra l'altro di monitorare il livello medio del mare tenendo conto di eventuali effetti geodinamici.

È infatti di fondamentale importanza tenere conto del riferimento temporale per valutare l'evoluzione dinamica del territorio su cui poggia il mareometro

stesso; misure effettuate in tempi differenti dovranno tenere conto delle eventuali variazioni geodinamiche intercorse.

Per il controllo della stabilità locale di ciascun sito i mareometri della rete IIM sono periodicamente collegati, mediante livellazione di elevata precisione, a caposaldi dislocati nelle aree limitrofe supposti stabili (inquadramento locale).

Come noto la Terra non è un corpo rigido, per cui le verifiche di stabilità locali non possono evidenziare eventuali effetti di tipo geodinamico dell'intera area di interesse del mareometro, portando così ad una apparente variazione del livello del mare (si veda la Figura 1). In tale situazione un generico punto P, supposto in area stabile, connesso al Mareometro e al tempo (t) risentirebbe pertanto erroneamente delle variazioni altimetriche $\Delta H_M(\text{to}, t)$ di tipo geodinamico interessanti l'area mareometrica a partire dal tempo di riferimento (to). La supposta stabilità del punto P richiederebbe ovviamente una stabilità della sua quota, riferita al livello del mare supposto anch'esso stabile, ossia $H_p(t) = H_p(\text{to})$. Trascurare l'eventuale effetto geodinamico $\Delta H_M(\text{to}, t)$ porterebbe ad una erronea valutazione della quota $H_p(t)$ in quanto il dislivello tra il mareometro ed il punto P risente anch'esso dell'effetto geodinamico legato al solo mareometro.

La Figura schematizza una situazione di abbassamento geodinamico dell'area mareometrica per la quale, in tal caso, il dislivello $\Delta H_{M,P}(t)$ osservato al tempo (t) tra mareometro M e un punto P si incrementerebbe di tale abbassamento $\Delta H_M(\text{to}, t)$ (negativo):

$$\Delta H_{M,P}(t) = \Delta H_{M,P}(\text{to}) + |\Delta H_M(\text{to}, t)|$$

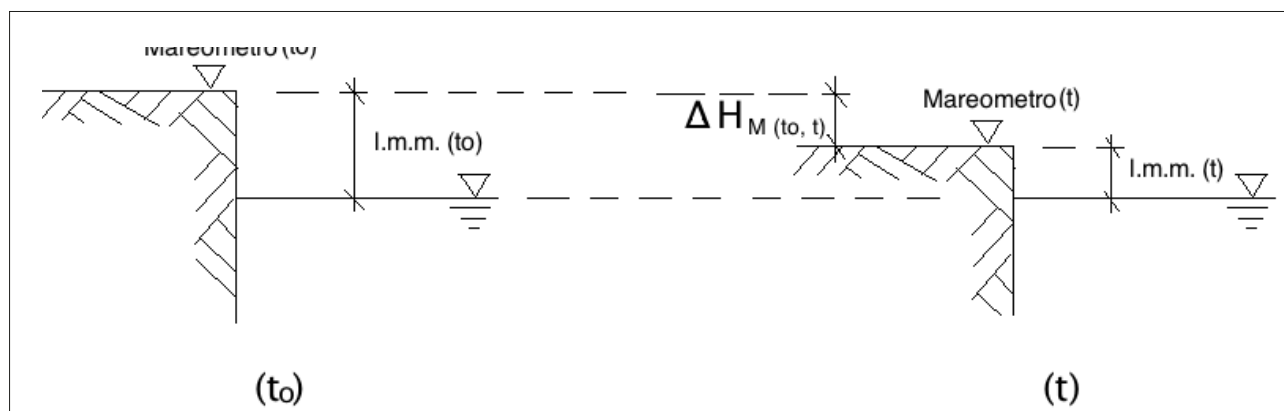
Supporre stabile il mareometro M porterebbe perciò ad una erronea valutazione della quota del punto P al tempo (t) che risulterebbe pari a:

$$H_p(t) = H_M + \Delta H_{M,P}(t)$$

dove la mancanza di riferimento temporale di H_M è dovuta all'erronea ipotesi di stabilità, ossia all'erronea ipotesi $H_M(t) = H_M(\text{to})$ invece che $H_M(t) = H_M(\text{to}) - |\Delta H_M(\text{to}, t)|$.

Risulterà pertanto un apparente innalzamento del punto P invece che il reale abbassamento dell'intera area ove è presente l'installazione del mareometro.

FIGURA 1 – Variazioni geodinamiche e loro ripercussione apparente su monitoraggio livello medio del mare



Tale esempio, seppure nella sua estrema semplicità, evidenzia l'importanza del monitoraggio della stabilità (o eventuale instabilità) dello stesso mareometro M, ossia della conoscenza di $\Delta H_M(t_0, t)$.

In tal caso infatti la quota del punto P sarebbe correttamente ottenuta tramite:

$$\begin{aligned} H_p(t) &= H_M(t) + \Delta H_{M,P}(t) = \\ &= [H_M(t_0) - |\Delta H_M(t_0, t)|] + [\Delta H_{M,P}(t_0) + |\Delta H_M(t_0, t)|] = \\ &= H_M(t_0) + \Delta H_{M,P}(t_0) = \\ &= H_p(t_0) \end{aligned}$$

risultando perciò stabile nel tempo, tenendo correttamente in conto della variazione di quota che il mareometro M si è assunto avere nel tempo.

Il monitoraggio della quantità $\Delta H_M(t_0, t)$ può avvenire per mezzo di osservazioni GNSS; il sistema GNSS infatti ha reso possibile la determinazione delle altezze ellissoidiche h per mezzo delle quali, note che siano le ondulazioni N del geode sarà possibile ottenere:

$$H = h - N$$

Attraverso l'installazione di una Stazione Permanente GNSS connessa al mareometro, è così possibile monitorare il mareometro stesso, valutandone le deformazioni geodinamiche prima ipotizzate $\Delta H_M(t_0, t)$ in quanto:

$$\Delta H_M(t_0, t) = \Delta h_M(t_0, t) - \Delta N_M(t_0, t)$$

Visto che la superficie geoidica risente in misura ridotta delle variazioni altimetriche del suolo, è lecito ipotizzare in prima approssimazione l'invarianza nel tempo delle ondulazioni del geode N . Risulterà pertanto che il monitoraggio delle altezze ellissoidiche $\Delta h_M(t_0, t)$ tramite GNSS è in prima approssimazione una buona valutazione delle variazioni delle altezze ortometriche $\Delta H_M(t_0, t)$.

Per ottenere ciò sarà pertanto necessario integrare l'infrastruttura mareometrica dell'IIM, con Stazioni Permanenti per il posizionamento GNSS, poste nelle vicinanze dei mareometri, periodicamente connesse a questi mediante livellazione di elevata precisione.

Grazie all'accordo in atto tra l'Istituto Idrografico della Marina e il Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale dell'Università degli Studi di Genova, è prevista la monumentazione di una SP GNSS in prossimità del mareometro di Genova.

Il piano è quello di estendere tale progetto all'intera rete mareometrica dell'IIM oltre che di includere possibilmente mareometri gestiti da altri centri di ricerca nazionali e internazionali.

Le SP associate ai mareometri dovranno avere caratteristiche tali da rispettare gli standard internazionali, per divenire così parte integrante di RDN, oltre che per un successivo inserimento nelle reti sovranazionali quali EUREF, europea, e ITRS/IGS, globale.

La realizzazione del progetto permetterà di passare da informazioni altimetriche attualmente limitate ad una validità nazionale, a quote ortometriche con riferi-

mento globale. Consentirà inoltre il mantenimento del Datum di altezza depurato dagli effetti perturbativi di tipo geodinamico, ottenendo così una conoscenza del sistema di altezze sempre più spinta, aggiornata e coerente anche a livello internazionale. Le conseguenze saranno di forte impatto, sia per la stima del geoide

gravimetrico che per altri aspetti come il monitoraggio della linea di costa legato ai cambiamenti climatici, lo studio delle correnti stazionarie, la determinazione delle orbite dei satelliti artificiali, la valutazione del deflusso delle acque, il monitoraggio del livello medio del mare e lo studio dei modelli oceanografici.

Bibliografia

- AA.VV. (2007). *Un libro bianco su I servizi di posizionamento satellitare per l'e-government – i risultati del Progetto di Rilevante Interesse Nazionale cofinanziato nel 2004 dal Ministero dell'Università e della Ricerca* – Ludovico Biagi, Fernando Sansò Editori – Geomatics Workbooks, vol. 7 (<http://geomatrica.como.polimi.it/workbooks/n7/list.php>).
- AA.VV. (2008). *Reti di stazioni permanenti GPS per il rilievo in tempo reale – i risultati del Progetto di Rilevante Interesse Nazionale cofinanziato nel 2005* – coordinatore Maurizio Barbarella – Bollettino SIFET (Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia) n. 2 e n. 3 (www.cisis.it).
- Baroni L., Cauli F., Farolfi G., Maseroli R. (2009). *Final results of the Italian "Rete Dinamica Nazionale" (RDN) of Istituto Geografico Militare Italiano (IGMI) and its alignment to ETRF2000* – IGM – Bollettino di Geodesia e Scienze Affini (www.euref.eu/TWG/EUREF%20TWG%20minutes/49-Budapest2009/05_Final_results_RDN.pdf).
- Barzaghi R., Carrion D., Carroccio M., Maseroli R., Venuti G. (2017). *Gravity Corrections for the updated Italian Leveling Network*, EUREF 2017 Symposium, Wroclaw (Poland).
- Godah W. (2017). *On the estimation of physical height changes using GRACE satellite mission data – a case study*, EUREF 2017 Symposium, Wroclaw (Poland).
- Iliffe J., Ziebart M., Turner J., Oliveira J., Adams R. (2006). *The VORF Project – Joining up Land and Marine Data*, GIS Professional. Issue 13.
- Pineau-Guillou L., Dorst L. (2011). *Creation of vertical reference surfaces at sea using altimetry and GPS*, Annales Hydrographiques, 6ème série, vol. 8, n. 777.