

## Griglie di dati GOCE calcolate tramite l'approccio space-wise

Andrea Gatti (\*), Federica Migliaccio (\*\*), Mirko Reguzzoni (\*\*), Fernando Sansò (\*)

(\*) DIAR, Politecnico di Milano, Polo Territoriale di Como, Via Valleggio 11, 22100 Como, Italy

(\*\*) DIAR, Politecnico di Milano, Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano, Italy

### Riassunto

L'obiettivo principale della missione satellitare GOCE dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) è la stima del campo gravitazionale terrestre con elevata accuratezza e risoluzione spaziale. Questa stima è solitamente espressa come una serie troncata di armoniche sferiche. Agli utenti vengono forniti i coefficienti della serie e la descrizione dell'errore di stima. Questo modello, propagando il potenziale incognito su una base globale finito-dimensionale e richiedendo inevitabilmente un certo grado di regolarizzazione, potrebbe essere meno informativo delle osservazioni originali in alcune aree geografiche. D'altra parte le osservazioni lungo orbita sono più complicate da usare, principalmente perché non sono filtrate, sono acquisite a diverse altezze, con diversi assetti e non hanno una distribuzione spaziale regolare. Un compromesso tra questi due tipi di dato, ovvero tra il modello globale e le osservazioni originali, è rappresentato da griglie di dati (ad esempio, valori delle derivate seconde radiali del potenziale gravitazionale) all'altezza media del satellite.

L'approccio space-wise è uno dei tre metodi ufficiali sviluppati per conto dell'ESA allo scopo di analizzare i dati GOCE. Una delle sue principali caratteristiche consiste nell'applicazione del metodo della collocazione per il calcolo di griglie sferiche di potenziale e delle sue derivate seconde all'altezza del satellite. Per questo motivo il metodo è stato ufficialmente selezionato all'interno della High-level Processing Facility per produrre griglie di dati GOCE da distribuire agli utenti come soluzione alternativa al modello globale in armoniche sferiche.

### Abstract

The main goal of the ESA-GOCE satellite mission is the estimation of the Earth gravity field with high accuracy and spatial resolution. This estimate is usually represented by a truncated series of spherical harmonic functions. The series coefficients and their error standard deviations (or as in the case of GOCE, the complete covariance matrix of the errors) represent the datasets generally provided to the users. However this model, being obtained by propagating the unknown potential onto a global finite-dimensional basis and inevitably requiring a certain amount of regularization, could be less informative than the original observations over certain geographical areas. On the other hand, observations along orbit are more difficult to use, mainly because they are not filtered and are acquired at different heights and with different satellite attitude, and do not have a regular spatial distribution. A good compromise between these two types of data, a global model and original observations, is represented by gridded data (e.g. values of second radial derivatives of the gravitational potential) at mean satellite altitude.

The space-wise approach, being one of three "official" methods developed for GOCE data analysis and supported by ESA, is basically characterized by the application of collocation to compute spherical grids of gravitational potential values and of its second derivatives at satellite altitude. That is why this method has been selected within the GOCE High-level Processing Facility (HPF) to compute gridded data to be distributed to the scientific users as alternative to global spherical harmonic models.

### Nuovi prodotti dalle osservazioni GOCE

L'estensione del periodo operativo della missione GOCE (Drinkwater et al., 2003) fino alla fine del 2012 ha portato alla richiesta, da parte dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), di proseguire con le attività della GOCE High-level Processing Facility (HPF) (Rummel et al., 2004): analisi dei dati e produzione di modelli del campo gravitazionale terrestre sempre più raffinati.

Durante la fase nominale della missione erano già state rilasciate tre diverse serie di modelli GOCE derivati tramite i tre approcci ufficiali: diretto, time-wise e space-wise (Pail et al., 2011).

Per la fase di missione "estesa" l'ESA ha deciso di differenziare i prodotti che saranno rilasciati agli utenti scientifici. In particolare, uno dei nuovi output sarà rappresentato da griglie di gradienti gravitazionali calcolati dalle osservazioni GOCE tramite l'approccio space-wise (Migliaccio et al., 2004; Reguzzoni & Tselfes, 2009) del Politecnico di Milano: tale approccio, basato sul principio della collocazione (Sansò, 1986), si presta particolarmente bene per la stima di queste griglie.

Attualmente, tramite l'approccio space-wise possono essere prodotte griglie di valori del potenziale  $T$  e delle derivate seconde radiali  $T_{rr}$ , con passo del grigliato  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ , e stime degli errori basate su simulazioni Monte Carlo (Migliaccio et al., 2009). Per dare un'idea della qualità di queste griglie di dati, la deviazione standard dell'errore predetto per la componente  $T_{rr}$ , calcolata in base a 500 campioni Monte Carlo, è pari a 0.9 mE per una latitudine  $|\varphi| < 80^\circ$  (si veda anche la Fig. 1).

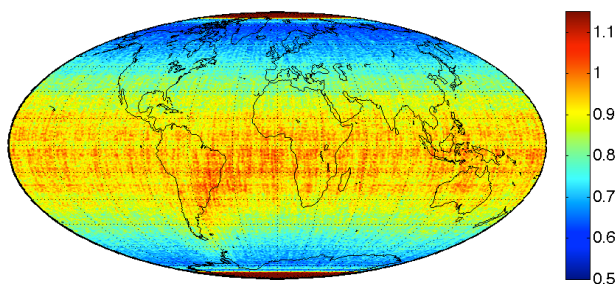


Figura 1. Deviazione standard dell'errore di  $T_{rr}$  (basato su 500 campioni Monte Carlo); i valori sono in milliEotvos.

### Vantaggi del contenuto informativo delle griglie di gradienti GOCE

Ci sono diverse ragioni per le quali può essere considerato particolarmente vantaggioso poter lavorare con griglie di dati derivati da osservazioni del satellite GOCE.

In primo luogo, esse rappresentano un buon compromesso fra contenuto informativo e facilità di utilizzo per le applicazioni scientifiche. Infatti, se da un lato i modelli globali danno la possibilità di derivare (attraverso procedimenti di sintesi armonica) valori del potenziale o di suoi funzionali in ogni posizione sulla o sopra la superficie terrestre, il fatto che tali modelli siano descritti tramite una base finita di funzioni armoniche globali e il fatto che nel loro calcolo vengano introdotti metodi di regolarizzazione (Tikhonov & Arsenin, 1977; Metzler & Pail, 2005) potrebbe renderli meno informativi dei dati originali. D'altra parte, le osservazioni sono di per sé i dati più informativi che abbiamo a disposizione, ma non sono filtrate e sono acquisite a diverse quote e con diversi angoli di assetto, mostrando quindi una distribuzione spaziale non regolare.

Un secondo vantaggio delle griglie ad alta risoluzione è che esse possono ben rendere conto delle differenti risoluzioni spaziali dei dati, in dipendenza della densità spaziale delle osservazioni raccolte dal satellite (si veda l'esempio della Fig. 2). Modelli globali di grado più elevato comporterebbero un più elevato livello di regolarizzazione, mentre griglie ad alta risoluzione accompagnate dalla deviazione standard dell'errore possono meglio rappresentare le osservazioni, cioè i dati originali.

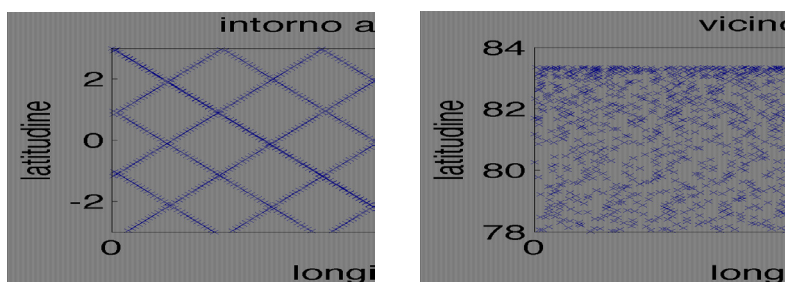


Figura 2. Esempio di distribuzione dei dati GOCE, basato sul data set acquisito durante i primi due mesi di missione.

In terzo luogo, le griglie possono permettere di recuperare informazione dove il rapporto segnale rumore ad alta frequenza (per gradi armonici maggiori di 240) è localmente elevato a causa di importanti strutture geofisiche. Si veda come esempio la Fig. 3, dove sono indicate le zone con rapporto segnale rumore superiore a 1 (in totale, il 3.5% dei dati raccolti da GOCE).

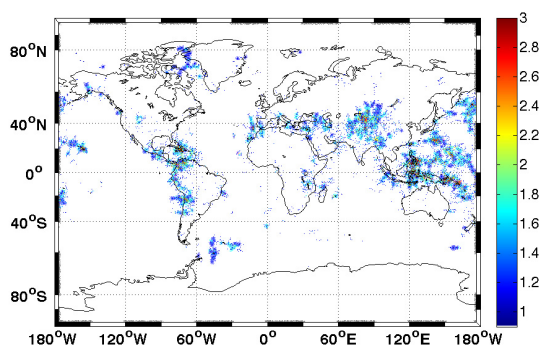


Figura 3. Zone con rapporto segnale rumore superiore a 1.

### Algoritmi aggiornati per il calcolo delle griglie

All'interno della procedura space-wise è naturalmente prevista la stima di griglie locali di valori del potenziale o di sue derivate seconde. Questa è dunque, per così dire, una caratteristica intrinseca del metodo di analisi dei dati GOCE sviluppato presso il Politecnico di Milano. Tuttavia, per rendere il software particolarmente adatto alla stima di griglie di valori di  $T$ ,  $T_{rr}$ ,  $T_{NN}$  oppure  $T_{EE}$ , è stato necessario procedere all'aggiornamento degli algoritmi e allo sviluppo di nuove routine. Si ricordi inoltre che, sempre per quanto riguarda la *gridding*, a causa dell'elevatissima quantità di dati acquisiti da GOCE, un'unica procedura di collocazione non è computazionalmente fattibile. Si deve dunque procedere applicando la collocazione su aree locali di dati.

La definizione di un modello di covarianza ottimale e computazionalmente accettabile ha richiesto uno sforzo significativo: quello utilizzato in precedenza (Tscherning, 1993), essendo basato sulle *degree variances*, forniva infatti una stima troppo grezza della matrice di covarianza del segnale. In definitiva si è scelto un modello basato sulle covarianze a blocchi dei coefficienti armonici raggruppati per ordine; tale modello è stato poi approssimato utilizzando le sole varianze dei coefficienti "adattate localmente" per ridurre l'onere computazionale.

A parte la modellazione della covarianza, sono stati sviluppati altri miglioramenti per l'approccio space-wise, in vista della produzione delle griglie di dati GOCE. In particolare, è stato perfezionato

il *pre-processing* dei dati, è già stato implementato il software per il *gridding* tramite collocazione che lavora con il nuovo modello di covarianza ed infine sono in corso di aggiornamento una serie di modifiche algoritmiche che consentiranno di migliorare e ottimizzare le prestazioni di calcolo.

### Nuove griglie di dati GOCE calcolate con l'approccio space-wise

Le griglie che saranno rese disponibili con la quarta generazione di prodotti GOCE, insieme ai modelli globali di geoid, saranno di due tipi:

- Griglie alla quota media del satellite, calcolate dal Politecnico di Milano (POLIMI) a partire da soli dati GOCE e rappresentative dei dati originali acquisiti lungo l'orbita. Il loro vantaggio sarà rappresentato dal fatto che esse saranno disponibili (rispetto ai dati originali) in un formato più facilmente utilizzabile dagli utenti scientifici e con un livello di errore molto più basso. Le griglie saranno fornite con la matrice di covarianza dell'errore.

Le caratteristiche di queste nuove griglie rilasciate agli utenti saranno le seguenti: la risoluzione sarà aumentata a  $0.2^\circ \times 0.2^\circ$  e saranno rese disponibili anche altre componenti dei gradienti della gravità (ad es.  $T_{NN}$  e  $T_{EE}$ ) oltre alla più comune derivata seconda radiale  $T_{rr}$ .

- Griglie (quasi) al livello del suolo, calcolate dall'Università di Copenhagen (UCPH) a partire da dati GOCE combinati con dati GRACE e dati di gravimetria nelle regioni polari. In tal modo queste griglie saranno dei prodotti immediatamente utilizzabili per applicazioni geofisiche. Queste griglie saranno fornite con le varianze dell'errore di stima.

Le caratteristiche di queste griglie saranno le seguenti: alta risoluzione spaziale ( $6' \times 6'$ ) e quota di riferimento fissata pari a 10 km. Le griglie saranno formate da valori di anomalie di gravità  $\Delta g$ , da derivate seconde radiali  $T_{rr}$ , eventualmente da alcune derivate seconde "orizzontali" quali  $T_{NN}$  e  $T_{EE}$ .

Riportiamo nelle Fig. 4 e Fig. 5 alcuni esempi di griglie ad alta risoluzione calcolate da POLIMI con la procedura aggiornata basata sull'approccio space-wise.

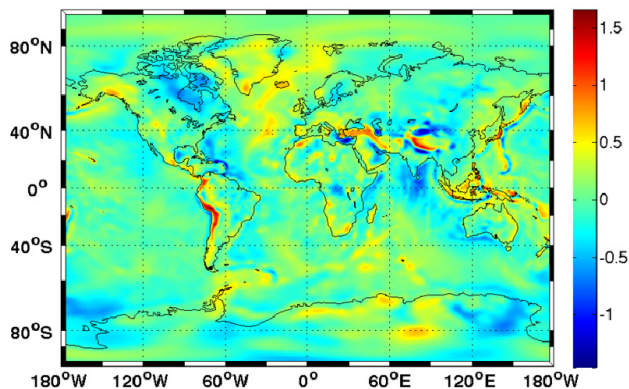


Figura 4. Griglia di dati di  $T_{rr}$  calcolata a partire da osservazioni GOCE; i valori sono in Eotvos.

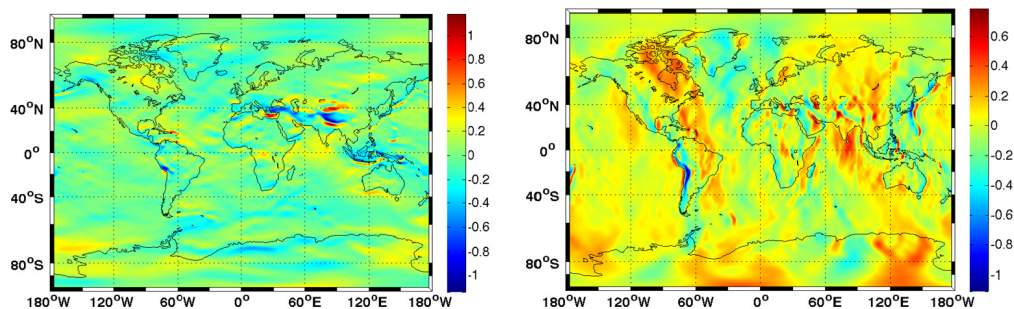


Figura 5. Griglie di dati di  $T_{NN}$  e  $T_{EE}$  calcolate a partire da osservazioni GOCE; i valori sono in Eotvos.

## Conclusioni

Con la quarta *release* ufficiale di dati GOCE da parte dell'ESA, saranno resi disponibili agli utenti anche prodotti diversi rispetto ai modelli globali di gravità in armoniche sferiche che erano stati finora rilasciati. I nuovi prodotti saranno calcolati all'interno della procedura di analisi dati basata sull'approccio *space-wise*, e saranno rappresentati da griglie di valori del potenziale e di alcune sue derivate seconde.

Per questo motivo, l'approccio *space-wise* è stato riadattato e migliorato proprio per renderlo ancora più adatto al calcolo delle griglie, ed in particolare per modellare meglio ed in modo locale la covarianza del segnale all'interno della procedura di collocazione. In questo modo si potrà tenere conto delle differenti caratteristiche del segnale o delle diverse densità delle osservazioni alle diverse latitudini.

Le nuove griglie di dati GOCE potranno costituire una valida alternativa ai dati grezzi ed ai classici modelli globali del campo della gravità terrestre, presentando un contenuto altrettanto informativo e una certa facilità di utilizzo per applicazioni geofisiche e di oceanografia.

## Riferimenti bibliografici

- Bruinsma S.L., Marty J.C., Balmino G., Biancale R., Förste C., Abrikosov O. & Neumayer H. (2010). GOCE gravity field recovery by means of the direct numerical method. In: *Proc. of the ESA Living Planet Symposium*, Bergen (Norway), ESA SP-686, ISBN 978-92-9221-250-6, ISSN 1609-042X.
- Drinkwater M.R., Floberghagen R., Haagmans R., Muzi D. & Popescu A. (2003). GOCE: ESA's First Earth Explorer Core Mission. In: *Earth gravity field from Space - from sensors to Earth Science*, Beutler G. et al. (eds), Space Sciences Series of ISSI, vol. 17, Kluwer Academic Publishers, pp 419-432.
- Mayrhofer R., Pail R. & Fecher T. (2010). Quick-look gravity field solution as part of the GOCE quality assessment. In: *Proc. of the ESA Living Planet Symposium*, Bergen (Norway), ESA SP-686, ISBN 978-92-9221-250-6, ISSN 1609-042X.
- Metzler B. & Pail R. (2005). GOCE data processing: the spherical cap regularization approach. *Studia Geophysica et Geodaetica*, Vol. 49, N. 4, pp. 441-462.
- Migliaccio F., Reguzzoni M. & Sansò F. (2004). *Space-wise* approach to satellite gravity field determination in the presence of coloured noise. *Journal of Geodesy*, Vol. 78, N. 4-5, pp. 304-313.
- Migliaccio F., Reguzzoni M., Sansò F. & Tselles N. (2007). On the use of gridded data to estimate potential coefficients. In: *Proc. of the 3<sup>rd</sup> International GOCE User Workshop*, Frascati, Rome (Italy), pp. 311-318. ESA SP-627. ISBN 92-9092-938-3, ISSN 1609-042X.

- Migliaccio F., Reguzzoni M., Sansò F. & Tselfes N. (2009). An error model for the GOCE space-wise solution by Monte Carlo methods. In: *LAG Symposia, "Observing our Changing Earth"*, Sideris M.G. (ed), Vol. 133, Springer-Verlag, Berlin, pp. 337-344.
- Migliaccio F., Reguzzoni M., Sansò F., Tscherning C.C. & Veicherts M. (2010). GOCE data analysis: the space-wise approach and the first space-wise gravity field model. In: *Proc. of the ESA Living Planet Symposium*, Bergen (Norway), ESA SP-686, ISBN 978-92-9221-250-6, ISSN 1609-042X.
- Pail R., Goiginger H., Mayrhofer R., Schuh W.D., Brockmann J.M., Krasbutter I., Höck E. & Fecher T. (2010). Global gravity field model derived from orbit and gradiometry data applying the time-wise method. In: *Proc. of the ESA Living Planet Symposium*, Bergen (Norway), ESA SP-686, ISBN 978-92-9221-250-6, ISSN 1609-042X.
- Pail R., Bruinsma S., Migliaccio F., Förste C., Goiginger H., Schuh W.D., Höck E., Reguzzoni M., Brockmann J.M., Abrikosov O., Veicherts M., Fecher T., Mayrhofer R., Krasbutter I., Sansò F. & Tscherning C.C. (2011). First GOCE gravity field models derived by three different approaches. *Journal of Geodesy*: Volume 85, Issue 11, Page 819-843.
- Reguzzoni M. & Tselfes N. (2009). Optimal multi-step collocation: application to the space-wise approach for GOCE data analysis. *Journal of Geodesy*, Vol. 83, N. 1, pp. 13-29.
- Rummel R., Gruber T. & Koop R. (2004). High Level Processing Facility for GOCE: Products and Processing Strategy. In: *Proc. of the 2nd International GOCE User Workshop*, ESA SP-569.
- Sansò F. (1986). Statistical methods in physical geodesy. In: *Lecture Notes in Earth Sciences, "Mathematical and Numerical Techniques in Physical Geodesy"*, Sünkel H. (ed), Vol. 7, Springer-Verlag, Berlin, pp. 49-155.
- Sneeuw N. & van Gelderen M. (1997). The polar gap. In: *Geodetic Boundary Value Problems in View of the One Centimeter Geoid*, Lecture Notes in Earth Sciences, Vol. 65, Springer, Berlin, pp. 559-568.
- Tikhonov A.N. & Arsenin V.Y. (1977). *Solutions of ill-posed problems*. John Wiley and Sons, New York.
- Tscherning C.C. (1993). Computation of covariances of derivatives of the anomalous gravity potential in a rotated reference frame. *Manuscripta Geodaetica*, Vol. 18, N. 3, pp. 115-123.
- Visser P.N.A.M., van den Ijseel J., van Helleputte T., Bock H., Jäggi A., Beutler G. & Heinze M. (2010). Rapid and precise orbit determination for the GOCE satellite. In: *Proc. of the ESA Living Planet Symposium*, Bergen (Norway), ESA SP-686, ISBN 978-92-9221-250-6, ISSN 1609-042X.