

A workflow for integrated gravity-seismic modelling of complex salt features.

Un workflow per la modellazione integrata di gravità e sismica di strutture saline complesse.

Candidato: Luigi Bianco

Relatore: Ch.mo Prof. Maurizio Fedi

Correlatori: Dr. Gianluca Gabbriellini; Dr. Andrea Vitale

Introduzione

I bacini sedimentari in cui si trovano depositi di sale sono da sempre uno dei principali target dell'esplorazione petrolifera. Negli ultimi anni, l'interesse esplorativo è rapidamente cresciuto, in particolare modo per i duomi salini, grazie al loro potenziale contributo verso la transizione energetica come reservoir per lo stoccaggio di gas nel sottosuolo. In questi contesti, i campi di potenziale rivestono un ruolo chiave nei processi integrati di processing ed interpretazione del dato. Ciò è dovuto al loro contributo nella delineazione di target particolarmente complessi o profondi, come ad esempio la base di un duomo salino o il top del sale autoctono (anche noto come sale madre). Questi tipi di sorgenti generano anomalie contraddistinte da diversi contenuti in frequenza. In particolare, un corpo più profondo, come il sale madre, originerà un segnale caratterizzato da una lunghezza d'onda maggiore e ampiezza minore. A causa di queste caratteristiche, l'interpretazione dei dati di gravità può essere molto ardua.

In ambito esplorativo è consuetudine acquisire contemporaneamente dati di gravità e del suo tensore gradiente. Questi dataset essendo caratterizzati da contenuti in lunghezza differenti avranno maggiore sensibilità verso rispettivamente verso sorgenti più o meno profonde.

L'interpretazione di questi dati è generalmente eseguita tramite inversione. Tuttavia, l'inversione di dati di campi di potenziale è fortemente affetta dall'ambiguità inerente, un problema che può essere arginato dall'introduzione di informazione "a-priori". In questo lavoro si propone un approccio avanzato e non convenzionale per l'inversione dei dati di campi di potenziale.

Il Workflow

Il workflow proposto (Fig.1) è basato matematicamente sull'algoritmo di inversione compatta, proposto da Portniaguine & Zhdanov (1999,2002), ma ottimizzato in modo differente. La principale modifica apportata consiste nell'utilizzo di una funzione oggetto diversa da quella proposta dagli autori, tale da incorporare i dati di gravità e del suo gradiente relativamente pesati fra loro. In aggiunta, è stata resa possibile l'introduzione di differenti tipi di vincoli: un modello di riferimento, i limiti sui valori di contrasti di densità degli orizzonti interpretati dalla sismica ed una funzione di peso del modello disomogenea così come proposta da Vitale & Fedi (2020).

Il workflow prevede il calcolo della derivata seconda verticale del campo di gravità, intesa come derivata prima della componente verticale del tensore gradiente misurato, ottenuta tramite il metodo ISVD (Fedi & Florio, 2001).

Successivamente si procede ad una inversione preliminare senza alcun tipo di vincolo, ciò fornirà un modello di riferimento del duomo salino, costituito dal corpo principale e code diffuse a bassi contrasti, che potranno essere eliminate data la loro inconsistenza geologica.

Infine, grazie all'utilizzo di tutti i vincoli introdotti, si procede ad una seconda inversione che restituirà un modello corretto dei corpi superficiali e di quelli più profondi.

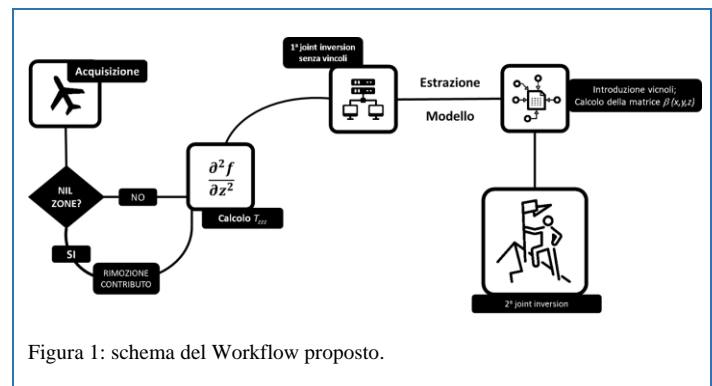


Figura 1: schema del Workflow proposto.

Algoritmo d'inversione

Per quanto riguarda l'inversione, la soluzione è ottenuta minimizzando la funzione oggetto di Tikhonov con un "minimum support stabilizing functional" (Portniaguine and Zhdanov, 2002):

$$\{\varphi(\mathbf{m}) = \|\mathbf{A}\mathbf{m} - \mathbf{d}\|_2^2 + \mu^2 \sum_{k=1}^M \frac{w_k^2 m_k^2}{m_k^2 + \varepsilon^2}\} \quad (1)$$

dove:

A è la matrice kernel;

m è il vettore dei parametri del modello;

d è il vettore dei dati osservati;

μ è il parametro di regolarizzazione;

k è lo step; uno scalare;

$\varepsilon > 0$ è un numero positivo molto piccolo;

w_k sono gli elementi di una matrice di peso per i parametri del modello. Gli autori hanno proposto che questa matrice

Workflow integrato per la modellizzazione di strutture saline

può essere determinata come la radice quadrata della matrice di sensibilità:

$$\mathbf{W}_z = \sqrt{\mathbf{S}} \quad (2)$$

dove \mathbf{S} è una matrice diagonale data da:

$$S_k = \sqrt{\sum_i (A_{ik})^2} \quad (3)$$

Per vincolare meglio la soluzione, è stata introdotta una funzione peso del modello diversa da quella proposta dagli autori dell'inversione focusing. Li & Oldenburg (1996) hanno introdotto una funzione di peso del modello come:

$$w_z = \frac{1}{(z+z_0)^\beta} \quad (4)$$

Cella & Fedi (2012) hanno dimostrato che il valore appropriato di β dovrebbe essere correlato a N , l'indice strutturale della sorgente, piuttosto che al decadimento del campo generato da un singolo blocco (Li & Oldenburg, 1996).

Vitale & Fedi (2020) hanno generalizzato questo approccio al campo di strutture complesse utilizzando una funzione peso disomogenea (inhomogeneous model weighting function):

$$w(x, y, z) = \frac{1}{z \left[\frac{\beta(x,y,z)}{2} \right]} \quad (5)$$

Per stimare $\beta(x,y,z)$ in ogni punto del dominio delle sorgenti e per costruire la funzione peso disomogenea del modello, è stato adottato l'approccio basato sulla funzione di ridimensionamento (Fedi & Florio, 2006).

È stata poi introdotta una modifica alla funzione oggetto al fine di aggiornare l'inversione focusing in un'inversione joint del gradiente di gravità e gravità.

A tal fine, la funzione oggetto del misfit sul dato $\|\mathbf{A}\mathbf{m} - \mathbf{d}\|_2^2$ è stata ampliata per incorporare tre diversi tipi di dati: i dati della gravità e i suoi derivati verticali del primo e del secondo ordine.

$$\|\mathbf{A}_g \mathbf{m} - \mathbf{d}_g\|_2^2 + \alpha \|\mathbf{A}_{g'} \mathbf{m} - \mathbf{d}_{g'}\|_2^2 + \tau \|\mathbf{A}_{g''} \mathbf{m} - \mathbf{d}_{g''}\|_2^2 \quad (6)$$

dove:

Aa,ij , ($i = 1, \dots, Ma, j = 1, \dots, N, a = [g, g', g'']$), rappresentano il contributo dell' i -esimo dato alla j -esima cella del modello; Mg che si riferisce ai dati di gravità, Mg' ai dati della derivata prima verticale del campo e, Mg'' ai dati della derivata seconda verticale del campo.

$\mathbf{d}_g, \mathbf{d}_{g'}, \mathbf{d}_{g''}$ sono rispettivamente i vettori dei dati.

α e τ sono i parametri che pesano l'importanza relativa dei dati dei gradienti di gravità e gravità alla funzione di minimizzazione.

Applicazione al modello SEAM

Il SEg Advanced Modelling (SEAM) è un progetto ricerca industriale collaborativo dedicato a simulazione numerica geofisica su larga scala. I progetti sono pensati per produrre modelli terrestri e dati simulati che rappresentino sfide geofisiche realistiche e significative. Il progetto "Phase I" ha prodotto un modello di un bacino salino del Golfo del Messico con la maggior quantità di fisica e realismo possibile grazie all'integrazione di dati di diverse industrie coinvolte nel progetto.

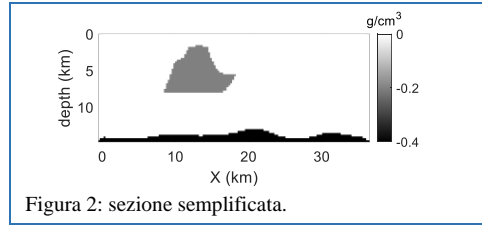


Figura 2: sezione semplificata.

Inizialmente è stata considerato un modello semplice, le cui geometrie sono estratte dalla sezione $Y=4000\text{m}$ del modello SEAM (Fig.2), mentre i contrasti di densità sono stati considerati omogenei per il duomo salino con i sedimenti circostanti e per il sale madre con i sedimenti circostanti (rispettivamente -0.2 g/cm^3 e -0.4 g/cm^3). Tali contrasti rappresentano i contrasti di densità medi del modello SEAM. Seguendo il workflow precedentemente descritto, si è proceduto all'inversione dei dati di gravità e delle sue derivate verticali di primo e secondo ordine, includendo tutti i vincoli introdotti nell'algoritmo. I limiti sui contrasti di densità sono stati ottenuti dall'interpretazione delle sezioni sismiche sintetiche del modello. Il risultato (Fig. 3) dimostra un'accurata ricostruzione sia del duomo salino che del sale madre.

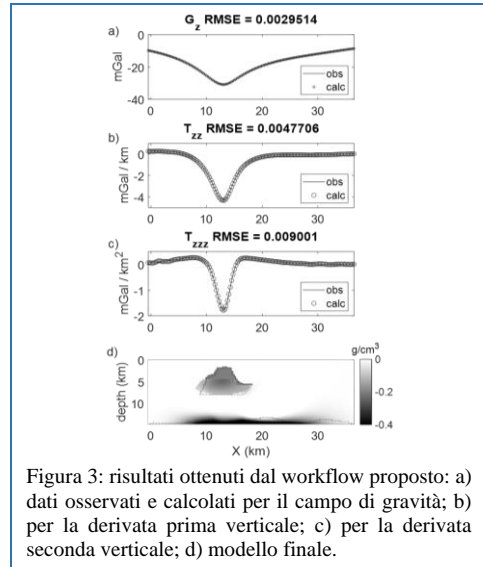
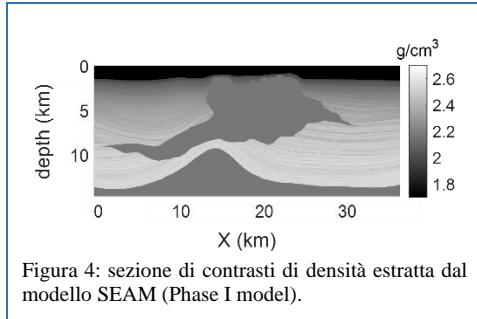


Figura 3: risultati ottenuti dal workflow proposto: a) dati osservati e calcolati per il campo di gravità; b) per la derivata prima verticale; c) per la derivata seconda verticale; d) modello finale.

Workflow integrato per la modellazione di strutture saline

Infine, il workflow è stato testato su un profilo estratto dal modello SEAM "Phase I", rappresentando un caso realistico (Fig. 4).



Il modello offre le anomalie di Bouguer di G_z e tutte le sei componenti del tensore gradiente, tra le quali è stata utilizzata T_{zz} , e dalla quale è stata ricavata la componente T_{zzz} . Grazie all'interpretazione sismica, è stato vincolato il top del sale, rendendo di fatti possibile la rimozione del contributo della zona del duomo a contrasto positivo, anche nota come nil zone.

Applicando il workflow alle anomalie residue, con tutti i vincoli illustrati, è stato possibile ottenere una ricostruzione delle strutture saline presenti.

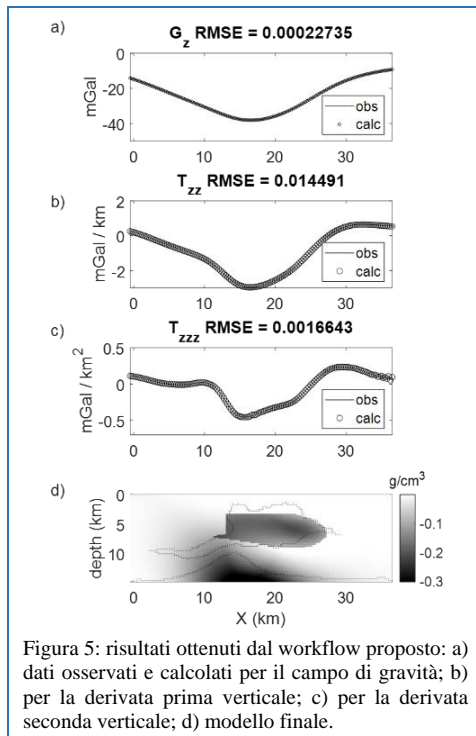


Figura 5: risultati ottenuti dal workflow proposto: a) dati osservati e calcolati per il campo di gravità; b) per la derivata prima verticale; c) per la derivata seconda verticale; d) modello finale.

Conclusioni

È stato presentato un workflow per la modellazione di strutture saline complesse attraverso un'inversione joint dei gradienti verticali del campo di gravità e del campo stesso. A tal fine, è stato sviluppato un nuovo algoritmo di inversione basato sull'inversione focusing, in cui è stato introdotto: a) una funzione oggetto del misfit sul dato espansa, tale da pesare la gravità e i suoi gradienti verticali; b) una funzione peso di profondità disomogenea; vincoli da informazioni sia geometriche che di densità provenienti da interpretazione sismica.

Grazie a questo workflow è possibile interpretare separatamente le strutture saline superficiali e profonde. La forza di questo metodo è nel peso relativo dei gradienti di gravità e del campo di gravità, permettendo quindi che i contenuti in lunghezza d'onda differenti siano considerati nelle varie fasi del processo. È stato possibile ottenere un'accurata modellazione delle sorgenti più profonde e stimare la profondità della base del duomo salino, noto per essere un compito difficile per l'elaborazione e l'interpretazione sismica, ma di fondamentale importanza a causa della sua influenza sulle stime del modello di velocità. Inoltre, è possibile modellare il sale madre nelle sue caratteristiche principali. Questo lavoro potrebbe rappresentare un importante miglioramento nei processi di esplorazione, fornendo informazioni aggiuntive e affidabili per gestire meglio le insidie comuni nell'elaborazione sismica ed evitare costosi errori di modellazione. Inoltre, il lavoro ha evidenziato l'importanza di integrare diverse informazioni nella modellazione di target complessi e il ruolo cruciale svolto dai campi di potenziale a sostegno della sismica.

L'alta versatilità del workflow e dell'algoritmo di inversione consentiranno di adattare quanto descritto per modellazione 3D, per l'interpretazione di dati magnetici e, comunque di sfruttare l'approccio proposto in tutti quei contesti geologici in cui vi è necessità di interpretare sorgenti poste a differenti profondità lungo la stessa verticale.

Workflow integrato per la modellizzazione di strutture saline

Riferimenti

Cella, F., and M. Fedi, 2012, Inversion of potential field data using the structural index as weighting function rate decay: *Geophysical Prospecting*, 60, 313–336, doi: 10.1111/j.1365-2478.2011.00974.x.GPPRAR0016-8025

Fedi, M., and G. Florio., 2001, Detection of potential fields source boundaries by enhanced horizontal derivative method: *Geophysical prospecting*, 49, 40-58, doi: 10.1046/j.1365-246X.2002.01767.x

Fedi, M., and G. Florio, 2006, SCALFUN: 3D analysis of potential field scaling function to determine independently or simultaneously Structural Index and depth to source: 76th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 963–967, doi: 10.1190/1.2372499.

Li, Y., and D. W. Oldenburg, 1996, 3-D inversion of magnetic data: *Geophysics*, 61, 394–408, doi: 10.1190/1.1443968

Portniaguine, O., and M. S. Zhdanov, 1999, Focusing geophysical inversion images: *Geophysics*, 64, 874-887, doi: 10.1190/1.1444596.

Portniaguine, O., and M. S. Zhdanov, 2002, 3-D magnetic inversion with data compression and image focusing: *Geophysics*, 67, 1532-1541, doi: 10.1190/1.1512749.

SEAM, 2007, SEG Advance Modeling. <https://seg.org/SEAM/data-sets/project/subsalt-p1/category/potential-fields#filter>.

Vitale, A. and M. Fedi, 2020, Self-constrained inversion of potential fields through a 3D depth weighting: *Geophysics*, 85, no.6, G143-G156, doi: 10.1190/geo2019-0812.1.