

Un tool per la modellizzazione di dati geofisici

Giuseppe Nunnari, Fabio Accetta, Placido Maria Montalto

Questo lavoro presenta un software per la modellizzazione delle deformazioni del suolo registrate in aree di vulcanismo attivo. In particolare, l'attenzione viene focalizzata sul problema della modellizzazione inversa, cioè nella ricerca dei parametri di una sorgente vulcanica che consente di interpretare le deformazioni misurate in superficie. Vengono riportati alcuni esempi di modellizzazione utilizzando sia dati generati sinteticamente che misurati sul campo. In particolare viene proposto un caso di inversione di dati di deformazione ottenuti da immagini Sar (Synthetic Aperture Radar).

L'esigenza di controllare il rischio vulcanico, al pari di altri rischi di tipo naturale e/o industriale, è sempre più pressante in un contesto sociale che valorizza sempre più la cultura della prevenzione. Reti di monitoraggio altamente automatizzate, ormai disponibili nelle aree di vulcanismo attivo nei paesi maggiormente industrializzati, quali l'Italia, consentono la capillare acquisizione dei principali parametri geofisici (deformazioni del suolo, anomalie magnetiche e gravimetriche, sismicità ecc.) e la loro trasmissione ad appropriati centri di monitoraggio. Tuttavia, la disponibilità di dati sullo stato di un vulcano attivo non è che il primo passo del processo di controllo di cui si è detto. Altrettanta importanza rivestono gli aspetti connessi con l'elaborazione e modellizzazione dei dati acquisiti. In questo contesto si colloca il software presentato in questo lavoro il cui scopo è quello di consentire la modellizzazione delle deformazioni del suolo e dei dati geomagnetici. Questo tool si offre quindi come un valido strumento ai ricercatori impegnati nell'interpretazione dei dati ai fini della comprensione dei meccanismi eruttivi.

I vantaggi che il tool permette di conseguire sono di due tipi. Da un lato esso consente di calcolare le deformazioni e le anomalie magnetiche attese al suolo in seguito all'azione di due dei principali meccanismi di sorgente considerati in letteratura (modellizzazione diretta). Dall'altro esso permette di effettuare la ricerca dei parametri delle sorgenti che meglio consentono di interpretare un set di dati osservati in superficie (modellizzazione inversa). Entrambe queste operazioni sarebbero oltremodo onerose e complesse senza l'ausilio di un tool del tipo presentato, sottraendo tempo alle ri-

sorse umane qualificate (i ricercatori) e impedendo il trattamento dei dati disponibili che, in quanto ingenti, spesso rimangono inutilizzati per tempi considerevoli.

I dati

Come sopra menzionato, in questo lavoro vengono considerati due dei principali tipi di dati geofisici utilizzati per il monitoraggio delle aree vulcaniche: le deformazioni del suolo e le anomalie del campo geomagnetico. Tuttavia, data la oggettiva difficoltà di illustrare tutte le caratteristiche del programma, in questo lavoro si è scelto di mostrarne alcune riguardanti esclusivamente i dati di deformazione del suolo.

Tali dati possono essere misurati sia mediante le tradizionali tecniche Edm (Electronic Distance Measurement), sia ricorrendo a tecniche di rilevamento satellitare. Tra queste ultime rivestono particolare importanza il sistema di posizionamento Gps (Global Positioning System) e, più recentemente, l'interferometria differenziale Sar (Synthetic Aperture Radar) [1-4]. Deformazioni del suolo rilevate con tecniche Edm, Gps o Sar rappresentano misure di tipo discontinuo, in quanto presuppongono la differenza tra due stati deformativi contigui nel tempo. Misure in continuo di deformazione possono essere rilevate utilizzando tiltmetri (ad esempio di tipo *borehole*) ma queste non sono considerate nell'attuale versione del programma.

I modelli di deformazione del suolo

La modellizzazione diretta consiste nel calcolo dei dati geofisici attesi al suolo, dovuti ad una sorgente vulcanica i cui parametri (es. posizione,

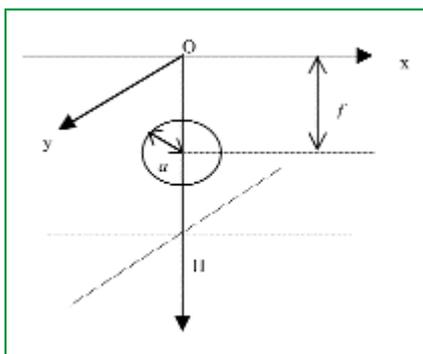


Figura 1 - Sorgente di Mogi: a ed f sono rispettivamente il raggio e la profondità del centro della sorgente

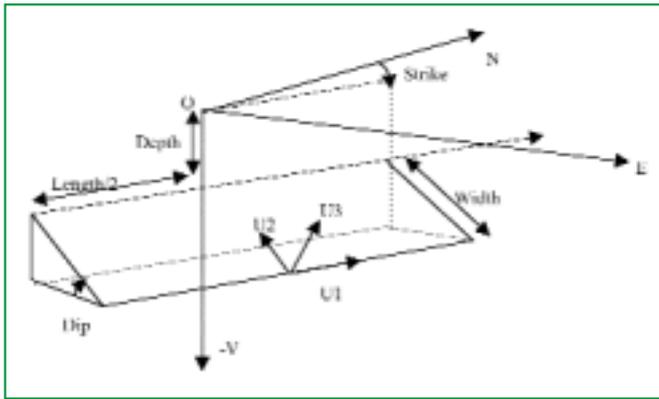


Figura 2 - Sorgente di Okada. Strike è l'angolo formato dalla sorgente rispetto al Nord. Dip rappresenta l'angolo di immersione della sorgente rispetto al piano orizzontale. Length e Width rappresentano rispettivamente la lunghezza e la larghezza della sorgente. U₁, U₂ e U₃ sono rispettivamente le componenti Strike, Dip e tensile dello spostamento

pressione idrostatica, inclinazione ecc.), espressi genericamente dal vettore θ , sono noti a priori. Le sorgenti maggiormente utilizzate, nel caso di deformazioni del suolo in aree vulcaniche, sono la sorgente di

Mogi (Figura 1) e quella di Okada (Figura 2). La prima è una sorgente sferica di pressione idrostatica che viene talvolta utilizzata per modellare la presenza di una camera magmatica; la seconda simula invece l'apertura di una dislocazione in cui si intrude il magma in fase di risalita. Entrambe le sorgenti si suppongono, al fine di semplificare gli schemi di calcolo, immerse in un semispazio elastico, omogeneo ed isotropo. In letteratura sono disponibili soluzioni in forma chiusa per calcolare le deformazioni attese al suolo (in termini di spostamenti) sia per la sorgente di Mogi [5] che per quella di Okada [6]. Esula dallo scopo del presente lavoro analizzare tali soluzioni; tuttavia, a scopo esemplificativo, vengono qui riportate le espressioni relative alle componenti dei vettori spostamento generati da una sorgente di Mogi e da una sorgente di Okada, limitatamente al caso di un movimento di tipo

Tabella I - Parametri della sorgente di Okada
Lunghezza lato griglia: 10 km

Dip (°)	Strike (°)	Length (km)	Width (km)	U ₁ (m)	U ₂ (m)	U ₃ (m)	Depth (km)	X _s (km)	Y _s (km)
89	180	1	2	0	0	3	2	1	1

tensile ($U_1=U_2=0$ e $U_3 \neq 0$). In particolare, le componenti u_x , u_y e u_z delle deformazioni rispetto agli assi coordinati (Figura 1) dovute ad una sorgente di Mogi sono espresse in (1)-(3).

$$u_x = \frac{C}{2\mu} \left\{ \frac{x}{R_1^3} - \frac{\lambda + 3\mu}{\lambda + \mu} \frac{x}{R_2^3} - \frac{6xz(z+D)}{R_2^5} \right\} \quad (1)$$

$$u_y = \frac{C}{2\mu} \left\{ \frac{y}{R_1^3} - \frac{\lambda + 3\mu}{\lambda + \mu} \frac{y}{R_2^3} - \frac{6yz(z+D)}{R_2^5} \right\} \quad (2)$$

$$u_z = \frac{C}{2\mu} \left\{ \frac{z-D}{R_1^3} - \frac{(\lambda - \mu)z - (\lambda + 3\mu)D}{(\lambda + \mu)R_2^3} - \frac{6z(z+D)^2}{R_2^5} \right\} \quad (3)$$

dove

$$R_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z-D)^2} \quad R_2 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z+D)^2} \quad (4)$$

λ e μ sono le costanti di Lamé e C è il momento di strain del nucleo. Nell'ipotesi che il raggio della sorgente sia sufficientemente piccolo confrontato con D, il momento C è dato da $-1/2 a^3 \Delta P$. Per un movimento tensile della sorgente di Okada si ha invece:

$$\begin{cases} u_x = \frac{U_3}{2\pi} \left[\frac{q^2}{R(R+\eta)} - I_3 \sin^2 \delta \right] \\ u_y = \frac{U_3}{2\pi} \left[\frac{-dfq}{R(R+\xi)} - \sin \delta \left\{ \frac{\xi q}{R(R+\eta)} - \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} \right\} - I_1 \sin^2 \delta \right] \\ u_z = \frac{U_3}{2\pi} \left[\frac{f'q}{R(R+\xi)} + \cos \delta \left\{ \frac{\xi q}{R(R+\eta)} - \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} \right\} - I_5 \sin^2 \delta \right] \end{cases} \quad (5)$$

dove

$$\begin{cases} p = y \cos \delta + d \sin \delta \\ q = y \sin \delta - d \cos \delta \\ f' = \eta \cos \delta + q \sin \delta \\ df = \eta \sin \delta - q \cos \delta \\ R^2 = \xi^2 + \eta^2 + q^2 = \xi^2 + f'^2 + df^2 \\ X^2 = \xi^2 + q^2 \end{cases} \quad (6)$$

ed inoltre

$$\begin{cases} I_1 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\frac{-1}{\cos \delta} \frac{\xi}{R+df} \right] - \frac{\sin \delta}{\cos \delta} I_5 \\ I_2 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} [-\ln(R+\eta)] - I_3 \\ I_3 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\frac{1}{\cos \delta} \frac{f'}{R+df} - \ln(R+\eta) \right] + \frac{\sin \delta}{\cos \delta} I_4 \\ I_4 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{\cos \delta} \left[\ln(R+df) - \ln(R+\eta) \sin \delta \right] \\ I_5 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{2}{\cos \delta} \tan^{-1} \frac{\eta(X+q \cos \delta) + X(R+X) \sin \delta}{\xi(R+X) \cos \delta} \end{cases} \quad (7)$$

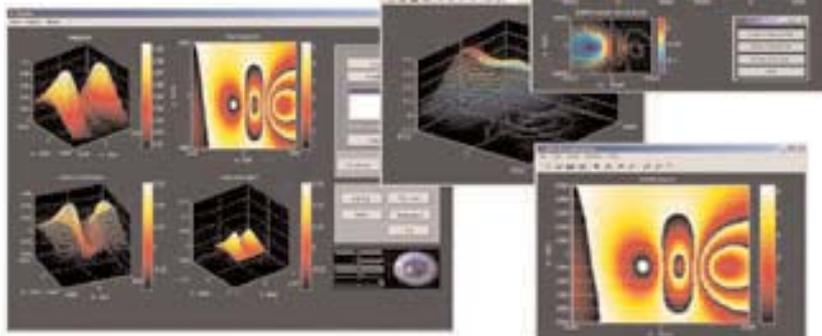


Figura 3 - Interfaccia grafica del tool

oppure

$$\begin{cases} I_1 = -\frac{\mu}{2(\lambda + \mu)} \frac{\xi q}{(R + \tilde{d})^2} \\ I_3 = \frac{\mu}{2(\lambda + \mu)} \left[\frac{\eta}{R + \tilde{d}} + \frac{\tilde{y} q}{(R + \tilde{d})^2} - \ln(R + \eta) \right] \\ I_4 = -\frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{q}{R + \tilde{d}} \\ I_5 = -\frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{\xi \sin \delta}{R + \tilde{d}} \end{cases} \quad (8)$$

La scelta tra le (7) e le (8) è decisa dall'angolo di Dip δ . In particolare, le (7) valgono se vale la condizione $\cos(\delta) \neq 0$. Nelle equazioni (5)-(8), (x, y, z) e (ξ, η, q) sono coordinate di appropriati sistemi di riferimento; R , \tilde{d} e \tilde{y} sono quantità scalari, ed il simbolo “||” è la notazione di Chinnery.

La disponibilità delle componenti dei vettori spostamento consente di calcolare agevolmente l'interferogramma sintetico corrispondente ad un assegnato pattern di deformazione [7], cioè l'immagine che rilevarebbe un satellite Sar, a meno degli effetti delle inevitabili sorgenti di rumore (dovuti, ad esempio, alla propagazione delle onde elettromagnetiche nella ionosfera). La generazione di un interferogramma sintetico può essere ottenuta calcolando la proiezione U_ρ , del vettore spostamento U , rispetto alla direzione di vista del satellite ρ , cioè:

$$U_\rho = \rho \cdot U = \rho_x U_x + \rho_y U_y + \rho_z U_z \quad (9)$$

dove U_x , U_y e U_z sono le componenti dello spostamento rispetto ad un sistema di riferimento (O, X, Y, Z) solidale con il suolo in superficie. Se σ (strike) rappresenta l'angolo di rotazione del sistema di riferimento (o, x, y, z) , solidale con la dislocazione, rispetto ad (O, X, Y, Z) , si ottiene:

$$\begin{cases} U_x = u_x \sin \sigma - u_y \cos \sigma \\ U_y = u_x \cos \sigma + u_y \sin \sigma \\ U_z = u_z \end{cases} \quad (10)$$

Descrizione del tool software

L'oggetto principale di questo lavoro è quello di descrivere un tool software che implementa i modelli precedentemente richiamati, al fine di consentire un'agevole elaborazione dei dati geofisici in questione. L'architettura del programma permette agli utenti più esperti di realizzare degli *script* MatLab al fine di impostare il lavoro di calcolo secondo le proprie specifiche esigenze mentre, ai meno esperti, offre una Gui per l'input guidato dei dati e la restituzione di risultati sia su file che in forma grafica (Figura 3). Più in dettaglio, il tool consente di:

- definire un insieme di sorgenti;
- calcolare le deformazioni e le anomalie magnetiche relative ad un set di sorgenti;
- calcolare interferogrammi Sar sintetici;

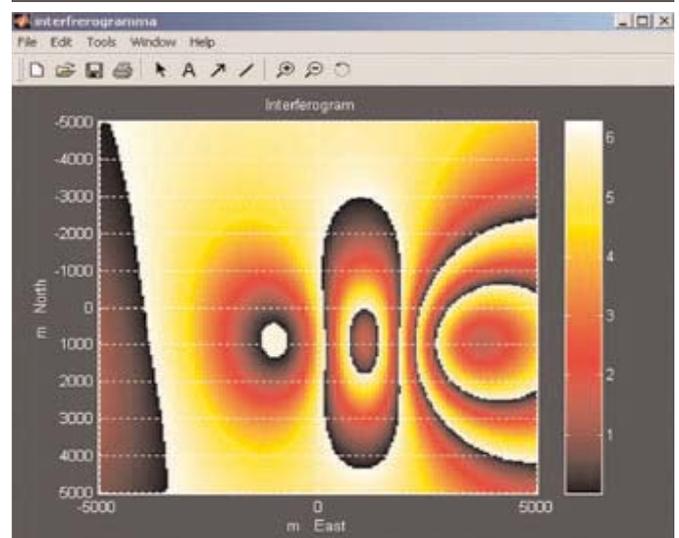
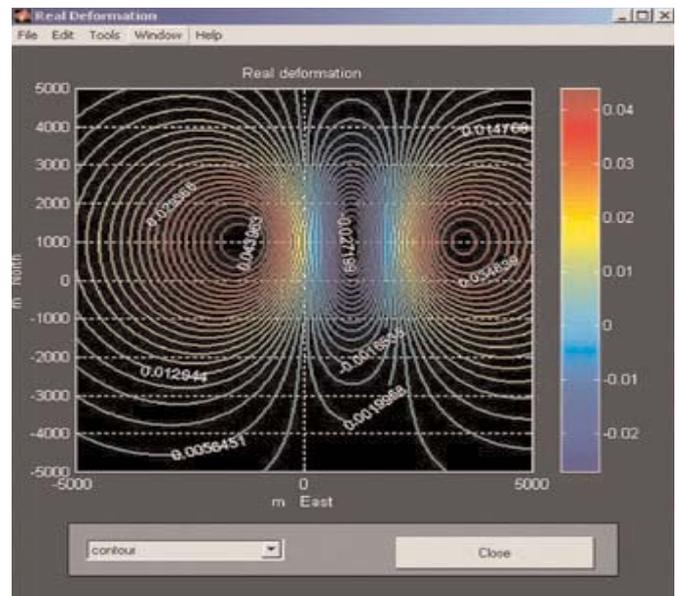
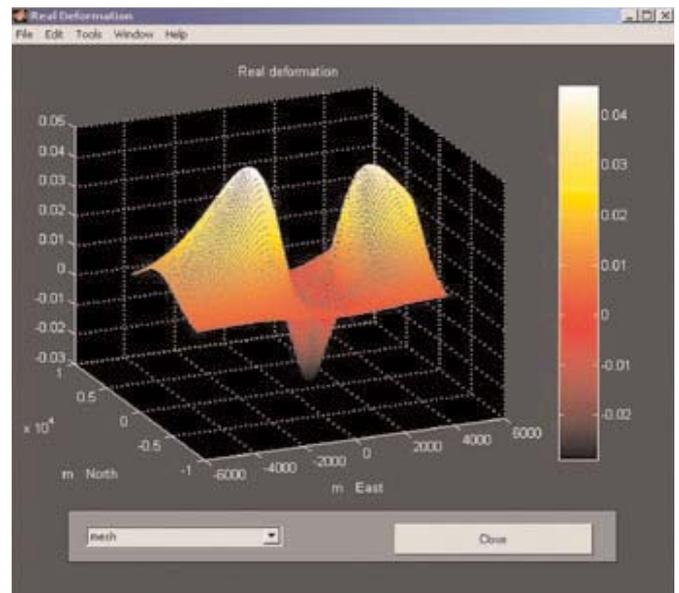


Figura 4 - Sorgente di Okada: (a) Deformazioni in 3D, (b) Curve isolivello delle deformazioni, (c) Interferogramma

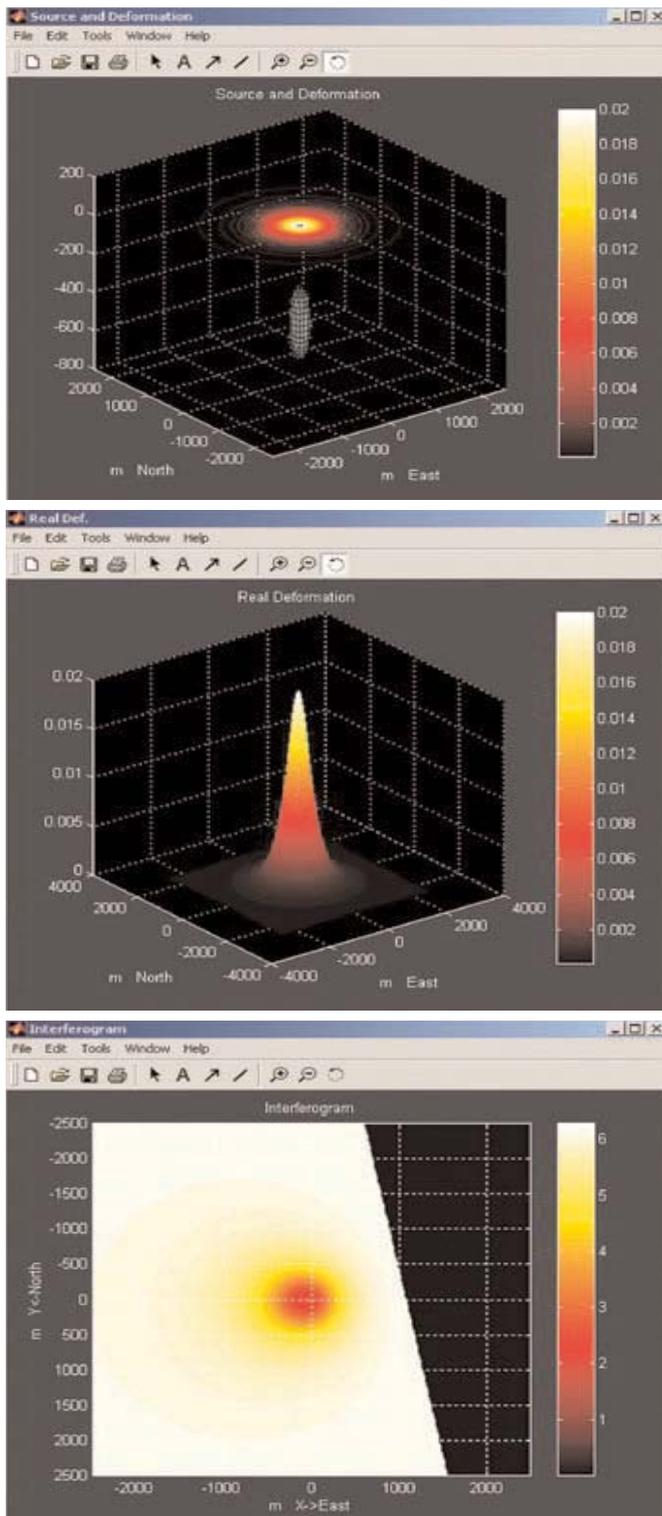


Figura 5 - Sorgente di Mogi: (a) Contour e sorgente (b) Rappresentazione in 3D, (c) Interferogramma Sar

- caricare dati di deformazione e/o dati magnetici misurati e ricercare, mediante l'uso di algoritmi genetici, i parametri delle sorgenti che meglio li approssimano.

Di seguito riportiamo alcuni risultati relativi al calcolo delle deformazioni attese in superficie, su una griglia regolare di punti, sia per una sorgente di Okada che per una di Mogi. I

parametri utilizzati nelle simulazioni sono riportati rispettivamente in Tabelle I e II. In Figura 4 e 5 vengono mostrate le rappresentazione in 3D delle componenti verticali delle deformazioni, le relative curve isolivello ed i corrispondenti interferogrammi Sar sintetici, relativi rispettivamente alla sorgente di Okada e a quella di Mogi.

Maschere come quelle mostrate in Figura 6 permettono la creazione guidata delle strutture dati necessarie al programma nonché delle griglie da utilizzare nelle simulazioni. Tali strutture possono, all'occorrenza, essere esportate verso ambienti di simulazione diversi da MatLab.

Modellizzazione inversa

La mappa che descrive un dato problema di modellizzazione diretta può essere descritta da un'espressione del tipo $d=f(\theta)$, essendo d un appropriato vettore che rappresenta i dati calcolati o misurati in superficie e θ il vettore dei parametri della sorgente. Il problema di modellizzazione inversa consiste, quindi, nel determinare una mappa del tipo $\theta=f^{-1}(d)$. È semplice rendersi conto, guardando ad esempio il modello diretto rappresentato dalle espressioni (1)-(3) oppure (5)-(8), che la funzione f^{-1} non esiste normalmente in forma chiusa. Inoltre, non è in generale possibile dare delle condizioni sull'esistenza della f^{-1} ed eventualmente sulla sua unicità. In questo lavoro eviteremo quindi di affrontare tali aspetti.

Una strategia, già per altro proposta [8] per ottenere un'approssimazione della funzione f^{-1} , consiste nell'utilizzare delle reti neurali di tipo *Perceptrone multi-strato*. In questo lavoro l'inversione è stata impostata in termini di programmazione non lineare ed in particolare si è scelto di utilizzare gli Algoritmi Genetici (GA) come metodo di ottimizzazione, in quanto offre delle garanzie riguardo al problema dei minimi locali. L'uso dei GA comporta la scelta di alcuni elementi caratteristici quali la funzione fitness, la soglia dell'errore ed il numero massimo di generazioni. Nel compiere tali scelte si è fatto ricorso all'esperienza derivante dalle numerose prove effettuate. È da sottolineare il fatto che l'implementazione dell'algoritmo è basata su operazioni in virgola mobile e non in codice binario come di consueto. La funzione costo può essere definita in vari modi. Ad esempio nel tool, quando il numero di punti di misura è sufficientemente alto, la funzione costo viene definita come indicato in (11) la cui minimizzazione comporta la massimizzazione dell'Indice di Agreement definito più avanti (si veda l'espressione (17)) nel presente lavoro.

**Tabella II
Parametri della
sorgente di Mogi
Lunghezza lato
Griglia: 5 km**

Depth (km)	Radium (km)	Pressure (MPa)
0,5	0,2	250

come metodo di ottimizzazione, in quanto offre delle garanzie riguardo al problema dei minimi locali. L'uso dei GA comporta la scelta di alcuni elementi caratteristici quali la funzione fitness, la soglia dell'errore ed il numero massimo di generazioni. Nel compiere tali scelte si è fatto ricorso all'esperienza derivante dalle numerose prove effettuate. È da sottolineare il fatto che l'implementazione dell'algoritmo è basata su operazioni in virgola mobile e non in codice binario come di consueto. La funzione costo può essere definita in vari modi. Ad esempio nel tool, quando il numero di punti di misura è sufficientemente alto, la funzione costo viene definita come indicato in (11) la cui minimizzazione comporta la massimizzazione dell'Indice di Agreement definito più avanti (si veda l'espressione (17)) nel presente lavoro.

$$J = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (11)$$

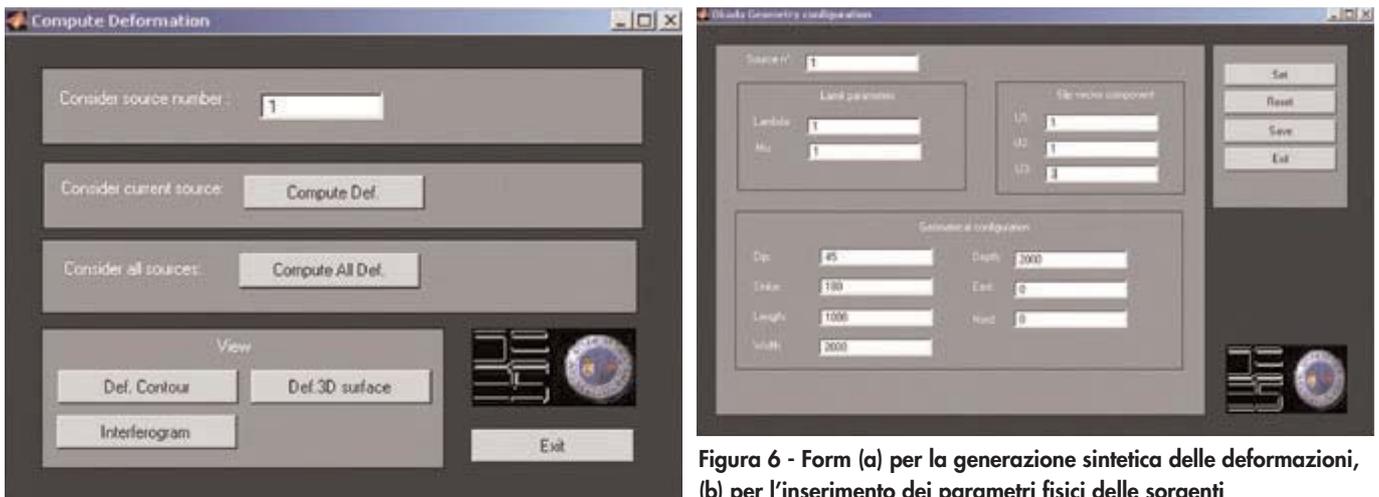


Figura 6 - Form (a) per la generazione sintetica delle deformazioni, (b) per l’inserimento dei parametri fisici delle sorgenti

Esempi di inversione di dati sintetici

Di seguito viene riportato un esempio di inversione dei parametri di una sorgente di Okada a partire da deformazioni sintetiche (ovvero generate ricorrendo alle espressioni (5)-(8)). I parametri del modello da invertire sono riportati in Tabella III. I parametri restituiti dall’algoritmo di inversione, arrestato dopo solo 5000 generazioni con un valore della funzione costo (11) pari a 0,001, sono mostrati in Tabella IV. Si può osservare una buona corrispondenza tra l’interferogramma atteso (Figura 7) e quello calcolato (Figura 8). L’accuratezza del tool, relativamente al problema di inversione, è stata testata su numerosi esempi generati uniformemente nello spazio dei parametri, al fine di poter calcolare dei *bound* per l’errore su ciascun parametro del modello. Numerose inversioni di deformazioni del tipo di Okada hanno restituito gli indici di bontà mostrati in Tabella V. Le espressioni che descrivono gli indici riportati in Tabella V sono le seguenti:

Tabella III - Parametri della sorgente di Okada da ricercare

Dip (°)	Strike (°)	Length (km)	Width (km)	U ₁ (m)	U ₂ (m)	U ₃ (m)	Depth (km)	X _S (km)	Y _S (km)
42,43	29,57	3,51	3,38	0,26	0,1	0,03	1,23	0,42	2,93

$$\text{Mean Error ME} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i) \quad (12)$$

$$\text{Mean Absolute Error Mae} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i| \quad (13)$$

$$\text{Mean Square Error Mse} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \quad (14)$$

$$\text{Root Mean Square Error Rmse} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (15)$$

Normalised Mean Absolute Error

$$\text{Mae\%} = 100 \cdot \frac{1}{R \cdot N} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i| \quad (16)$$

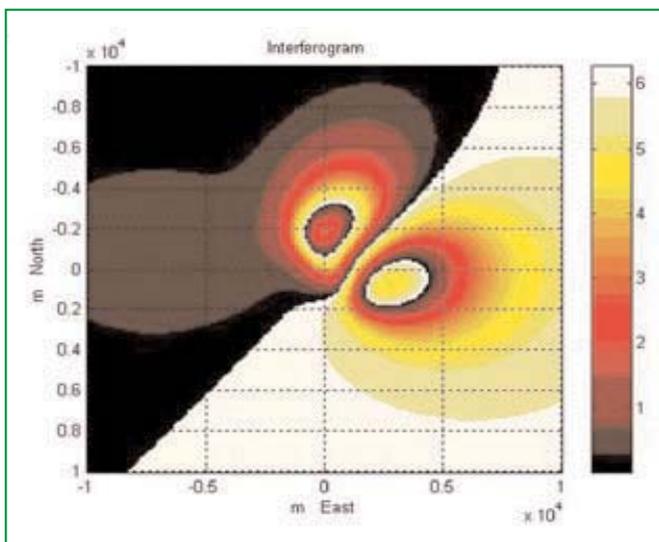


Figura 7 - Interferogramma del modello da invertire

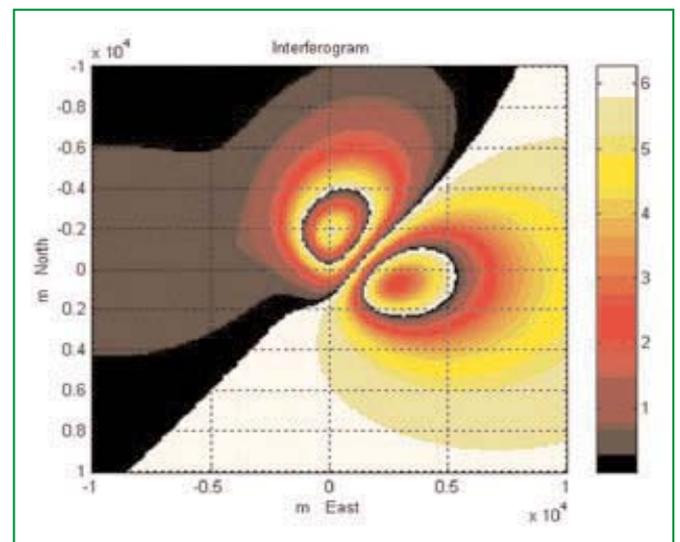


Figura 8 - Interferogramma del modello invertito

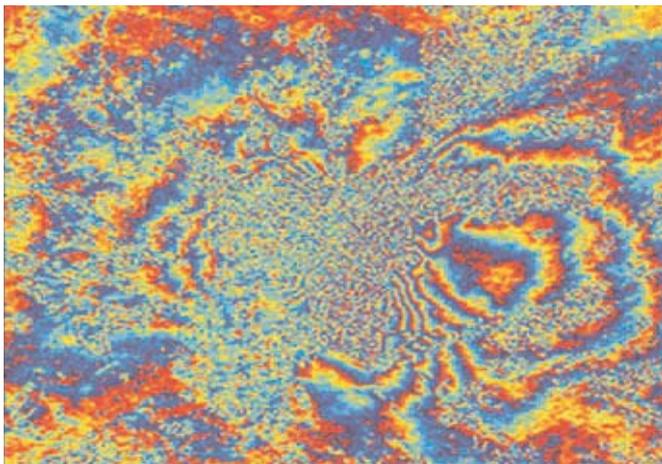


Figura 9 - Interferogramma reale

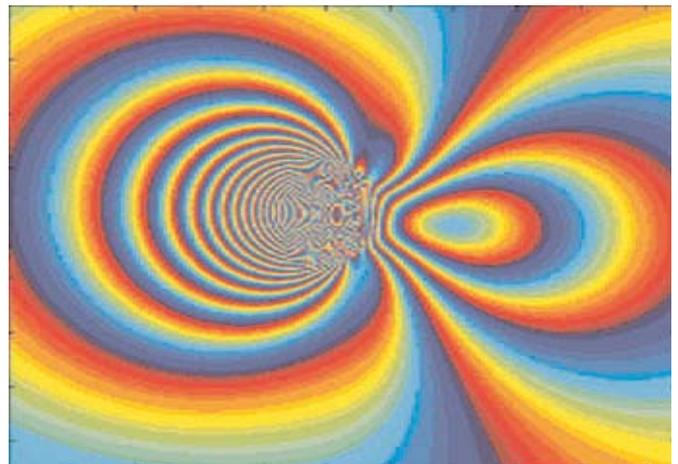


Figura 10 - Interferogramma liscio

Indice di Agreement

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (17)$$

Nelle espressioni (12)-(17), P_i ed O_i rappresentano rispettivamente il valore calcolato e quello atteso della grandezza in questione (ad esempio deformazione o dato geomagnetico) nell' i -esimo punto di osservazione, N il numero di osservazioni ed R il range di variazione del valore del parametro cui l'indice si riferisce. Le grandezze contrassegnate con il segno ($\bar{}$) rappresentano i valori medi. Dai risultati riportati in Tabella V si nota che l'algoritmo proposto è in grado di effettuare l'inversione di dati sintetici con elevata precisione. Ad esempio, si osservi come il Mae% sia ben al di sotto del 5% e l'Indice di Agreement sempre molto prossimo a 1.

Un esempio di inversione di dati reali

Il tool descritto è stato utilizzato per eseguire l'inversione di dati geofisici reali. A titolo di esempio viene di seguito descritta l'inversione di un interferogramma reale, registrato in occasione dell'eruzione verificatasi sull'Etna nel 2001.

Tabella IV - Parametri della sorgente restituiti dall'algoritmo di ricerca

Dip (°)	Strike (°)	Length (km)	Width (km)	U ₁ (m)	U ₂ (m)	U ₃ (m)	Depth (km)	X _S (km)	Y _S (km)
45,05	30,41	3,16	3,12	0,45	0,16	0,05	1,64	0,64	2,85

L'interferogramma reale, rilevato dal satellite Ers2, è riportato in Figura 9. Tale interferogramma è stato pre-elaborato al fine di rendere meglio definiti

i contorni delle *frange*. In tal modo il processo di ricerca dei parametri della sorgente risulta relativamente semplificato. Il risultato della "lisciatura" è visibile in Figura 10. Un'ulteriore operazione, preliminare alla ricerca, è quella di ridurre il numero di pixel dell'immagine, passando dal formato 850x1050 al formato 18x22, in modo da alleggerire il carico computazionale dell'algoritmo di inversione. Quest'ultima immagine è mostrata in Figura 11. Viene quindi avviata la procedura di ricerca basata sull'uso degli algoritmi genetici a partire dall'interferogramma di Figura 11, ottenendo i parametri di una sorgente di Okada riportati in Tabella VI. L'interferogramma sintetico associato a questa sorgente è mostrato in Figura 12. Il risultato in Tabella VI indica un dicco (o dislocazione) quasi verticale (Dip=83,91°) con un piccolo angolo di strike, caratterizzato da un movimento essenzialmente di apertura (deformazione tensile), essendo la componente U₃ preponderante rispet-

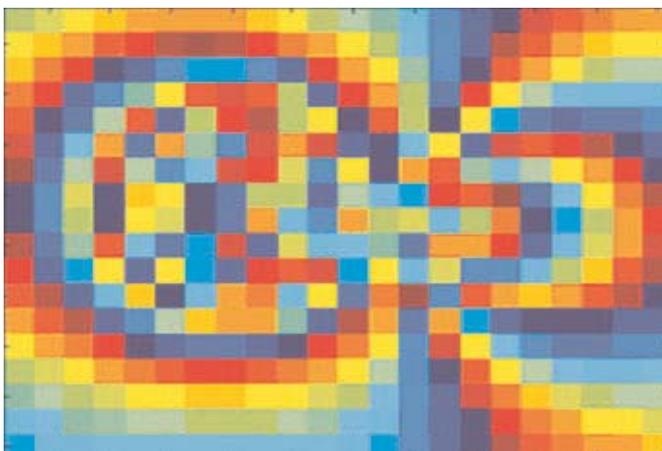


Figura 11 - Interferogramma ridotto (18x22)

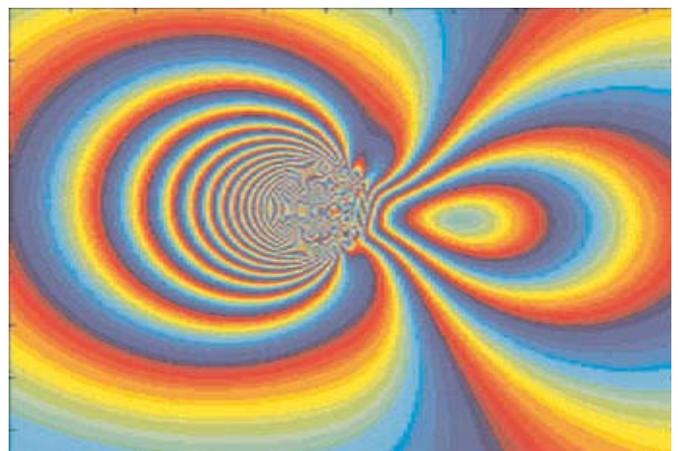


Figura 12 - Interferogramma ottenuto dall'inversione

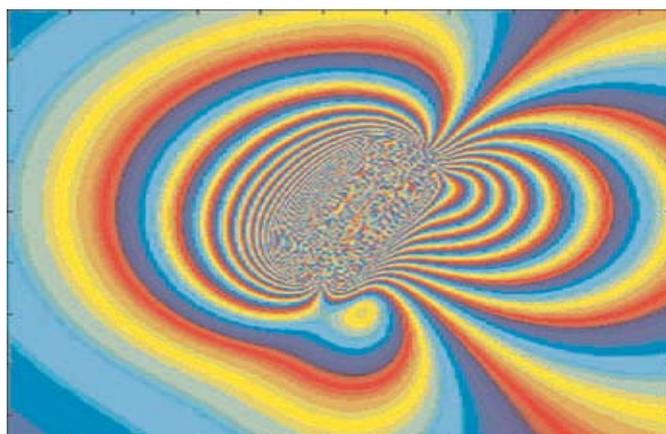


Figura 13 - Interferogramma sintetico ottenuto dalla sorgente di Tabella VII

**Tabella VII
Parametri
della sorgente
di Okada ottenuti
dall'inversione
dei dati Gps**

Dip (°)	84,32
Strike (°)	33,55
Length (km)	5,03
Width (km)	0,73
U ₁ (m)	4,75
U ₂ (m)	-4,92
U ₃ (m)	2,27
Depth (km)	0,24
Xs (Utm)	501,52
Ys (Utm)	4175,20

10 e quello in Figura 12, relativo alla soluzione riportata in Tabella VI. Tuttavia, per meglio valutare la bontà della soluzione ottenuta, si è tratto vantaggio dalla disponibilità di dati Gps acquisiti nello stesso periodo dei dati Sar (Figura 9). I dati Gps sono stati sottoposti ad inversione utilizzando l'algoritmo GA e minimizzando la funzione costo Mse (Mean Square Error) (si veda l'espressione (14)). I parametri della sorgente trovati sono riportati in Tabella VII ed il corrispondente interferogramma sintetico in Figura 13. Il confronto tra i parametri di Tabella VI e Tabella VII indica che vi è una buona corrispondenza tra le coordinate della sorgente Xs e Ys, gli angoli Dip e Strike e l'entità del movimento di apertura U₃, mentre risultano sensibilmente diversi i valori di U₁ ed U₂. Ciò indica che le misure Gps, essendo misure puntuali, sono in grado di definire meglio il movimento compiuto dalla dislocazione rispetto a quanto sia

Tabella V - Indici di performance nel caso di inversioni di sorgenti di Okada

Parametro	ME	Mae	Mse	Rmse	Mae%	d
Dip	-0,2533	0,2533	0,0984	0,3136	0,2815	0,9999
Strike	-0,2435	0,2435	0,1033	0,3215	0,0676	0,9997
Length	0,0177	0,0177	0,0006	0,0247	0,2952	0,9965
Width	0,0027	0,0132	0,0002	0,0155	0,3291	0,9978
U1	-0,0642	0,1390	0,0244	0,1561	3,4742	0,9990
U2	0,1998	0,1998	0,0448	0,2117	4,9946	0,9904
U3	-0,0048	0,0206	0,0004	0,0210	0,5161	0,9972
Depth	0,1206	0,1206	0,0177	0,1330	3,0139	0,9956
Xs	-0,1455	0,1355	0,0332	0,1822	0,7275	0,9877
Ys	0,0178	0,2666	0,0802	0,2831	1,3329	0,9994

to a U₁ e U₂. Si può osservare una buona corrispondenza visiva tra l'interferogramma di Figura

possibile fare con le misure da satellite. È comunque da sottolineare che, nelle applicazioni, le misure Sar e quelle Gps vengono considerate come set di misure da integrare vicendevolmente piuttosto che come misure da utilizzare indipendentemente, come fatto in questa sede per ragioni esemplificative.

Conclusioni

In questo lavoro è stato presentato un tool software che consente di effettuare la modellizzazione diretta ed inversa di dati di deformazione registrati in area vulcanica. Il suo utilizzo rappresenta un valido strumento nell'ambito dell'automazione delle reti di monitoraggio delle aree di vulcanismo attivo, contribuendo a ridurre notevolmente i tempi di calcolo e quindi quelli dei processi decisionali.

Bibliografia

[1] D. Massonnet, T. Rabaute, *Radar Interferometry: Limits and Potential*, Ieee Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 31, 2 (1993), 435.
 [2] M. Coltelli, L. Dutra *et al.*, *Sir-C/X-Sar Interferometry over Mt. Etna: Dem Generation, Accuracy Assessment and Data Interpretation*, Dlr-Forschungsbericht 95-48, (1996).
 [3] R. Lanari, G. Fornaro *et al.*, *Generation of Digital Elevation Models by Using Sir-C/X-Sar Multifrequency Two-Pass Interferometry: The Etna Case Study*, Ieee Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 34, 5 (1996) 1097.
 [4] P. Briole, A. Avallone *et al.*, *Interferometrie Radar Appliquée aux Volcans: Cas de L'Etna et des Champs Phlégréens (Italie)*, Rapport Quadriennal CNFGG 1995-1998, pres. at Union Internationale de Geodesie et Geophysique, Birmingham, (1999) 121.
 [5] K. Mogi, *Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them*, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo (1958), 36, 99.
 [6] Y. Okada, *Surface deformation due to shear and tensile faults in a halfspace*, Bull. Seismol. Soc. Amer., 75, (1985), 1135.
 [7] G. Nunnari, G. Pugliesi *et al.*, *Modelling Sar Interferometric Data in Volcanic Areas*, Proc. of the International Conference for Mathematical Geology, Iamg 2003, Portsmouth (UK), September 2003, 1.
 [8] G. Nunnari, L. Bertuccio, F. Ferrucci, *A Neural Approach to the Integrated Inversion of Geophysical Data Types*, Ieee, 2001. ■

Tabella VI - Parametri della sorgente di Okada ottenuti dall'inversione dell'interferogramma di Figura 11

Dip (°)	Strike (°)	Length (km)	Width (km)	U ₁ (m)	U ₂ (m)	U ₃ (m)	Depth (km)	Xs (Utm)	Ys (Utm)
83,91	7,73	2,02	3,50	0,53	-0,35	2,97	0,96	500,49	4175,54

Ringraziamenti - Il presente lavoro è stato svolto con il contributo del Gruppo Nazionale per La Vulcanologia. Si ringraziano G. Pugliesi, F. Guglielmino e C. Del Negro dell'INGV Sezione di Catania per aver messo a disposizione i dati reali utilizzati nel presente lavoro e gli utili suggerimenti.