

# Rapporti tecnici

## INGV

Rilievi magnetici ad alta risoluzione in  
aree antropizzate (Torregaveta e Ischia  
porto, Campania) finalizzati alla  
localizzazione di condotte sottomarine

# 117



## **Direttore**

Enzo Boschi

## **Editorial Board**

Raffaele Azzaro (CT)

Sara Barsotti (PI)

Mario Castellano (NA)

Viviana Castelli (BO)

Anna Grazia Chiodetti (AC)

Rosa Anna Corsaro (CT)

Luigi Cucci (RM1)

Mauro Di Vito (NA)

Marcello Liotta (PA)

Lucia Margheriti (CNT)

Simona Masina (BO)

Nicola Pagliuca (RM1)

Salvatore Stramondo (CNT)

Andrea Tertulliani - coordinatore (RM1)

Aldo Winkler (RM2)

Gaetano Zonno (MI)

## **Segreteria di Redazione**

Francesca Di Stefano - coordinatore

Tel. +39 06 51860068

Fax +39 06 36915617

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860055

Fax +39 06 36915617

[redazionecen@ingv.it](mailto:redazionecen@ingv.it)



# Rapporti tecnici INGV

**RILIEVI MAGNETICI AD ALTA RISOLUZIONE IN AREE  
ANTROPIZZATE (TORREGAVETA E ISCHIA PORTO, CAMPANIA)  
FINALIZZATI ALLA LOCALIZZAZIONE DI CONDOTTE SOTTOMARINE**

Stefano Ruggieri, Gemma Aiello, Francesco Paolo Buonocunto, Ennio Marsella, Salvatore Passaro

CNR (Istituto per l'Ambiente Marino Costiero - Sede di Napoli)

# 117



## Indice

Introduzione .....	5
1. Inquadramento geologico .....	6
2. Acquisizione dei dati magnetici .....	9
3. Elaborazione dei dati magnetici .....	11
3.1 Metodiche utilizzate per il <i>pre-processing</i> .....	12
3.1.1 Correzione di <i>offset</i> o di <i>layback</i> .....	12
3.1.2 Controllo degli incroci .....	12
3.2 Algoritmi di processing utilizzati .....	13
3.2.1 Continuazione nella regione armonica .....	13
3.2.2 Equazione di Poisson .....	14
3.2.3 Riduzione al polo (RTP) .....	14
3.2.4 Segnale analitico .....	15
4. Risultati .....	15
4.1 Ischia Porto .....	15
4.2 Torregaveta .....	20
5. Conclusioni .....	24
Bibliografia .....	32



## Introduzione

La determinazione della presenza di oggetti nell'immediato sottofondo in aree marine antropizzate (quali le aree portuali o settori di costa sensibili in termini di navigazione e messa in posto di opere di ingegneria civile costiera) è considerato uno degli elementi fondamentali della gestione sostenibile delle coste. Al controllo della gestione integrata dello sviluppo costiero (*Integrated Coastal Zone Management*, ICZM) negli ultimi anni sono confluite le autorità di controllo locali e nazionali, gli enti di ricerca e gli "assegnatari" delle responsabilità a livello civile e politico. Questi hanno riconosciuto la necessità di ispezionare preventivamente i fondali delle zone costiere in situazioni legate ad interventi quali installazione di manufatti, opere di manutenzione, installazione o monitoraggio di opere di ingegneria costiera, in tematiche di vario tipo, dall'esplorazione archeologica alla presenza di manufatti non cartografati (opere civili, tubi, condotte, cavi di vario genere, etc). Tipicamente, l'interfaccia acqua/sedimento viene ispezionata con l'ausilio di tecniche acustiche con emissioni ad alta frequenza (batimetria multifascio ed ecoscandaglio a scansione laterale, 100-500 KHz), mentre è pratica comune utilizzare tecniche acustiche (sismica monocanale ad alta risoluzione, 3-16 KHz circa in termini di frequenza di emissione dell'impulso acustico delle sorgenti) come metodo di prospezione anche in questi settori, per i quali la composizione sabbiosa dei fondali (scarsamente penetrabili con sorgenti caratterizzate da queste frequenze) ed i bassi valori di profondità (il *beam-forming* di molte strumentazioni non è certificato in battenti d'acqua inferiori a 10-15 m) ne sconsigliano l'utilizzo. Inoltre, frequenze più basse (1 KHz o minori) producono risultati troppo poco risolutivi per questo tipo di ispezione.

Il metodo magnetico consente di determinare geometria e profondità di corpi sommersi/sepolti, qualora questi siano caratterizzati da una differenza nel valore del contrasto di suscettività magnetica rispetto al sedimento che li contiene, ed è considerato uno standard di altissimo profilo per la determinazione della presenza di oggetti sepolti in ambiente subaereo [Telford et al., 1991]. In molti siti archeologici di grande rilievo le operazioni di scavo sono state guidate dai risultati di rilievi magnetici o multi-disciplinari comprendenti il metodo magnetico [Chavez et al., 2001; Drahor et al., 2008; Di Fiore e Chianese, 2008; Arciniega-Ceballos et al., 2009]. Tra le applicazioni documentate in ambiente marino Boyce et al. [2009] hanno rinvenuto siti di ancoraggio e depositi di ambiente portuale risalenti all'epoca romana, in Israele; Quinn et al., [2002] hanno caratterizzato il relitto di una nave francese del '700 (la "Surveillante"), mentre interessanti risultati provengono dall'esplorazione di un sito di scarico di materiali ed ordigni bellici inquinanti, risalenti alla seconda guerra mondiale, nel Mar Baltico, nel quale gli autori hanno caratterizzato la presenza di oggetti sepolti delle dimensioni del metro [Missiaen e Feller, 2008].

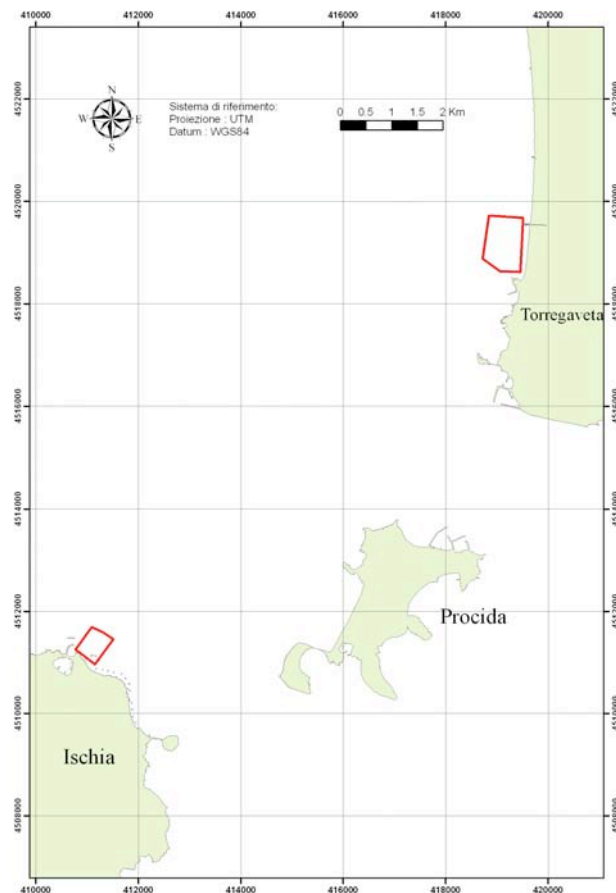
Da un punto di vista metodologico, la natura dipolare delle anomalie magnetiche richiede l'applicazione di algoritmi di elaborazione per valutare l'estensione reale di un corpo sorgente magnetizzato, tra questi il più classico è la Trasformazione Funzionale di Riduzione al Polo (RTP). È ben noto che la forma dell'anomalia magnetica residua prodotta da un corpo magnetizzato riflette la direzione del vettore di magnetizzazione totale (*Total Magnetization Vector*, TMV), il quale è a sua volta il risultato dell'interazione dei vettori di magnetizzazione rimanente (*Remnant Magnetization Vector*, RMV, che rappresenta la magnetizzazione del corpo che produce l'anomalia) e indotta (*Induced Magnetization Vector*, IMV, che rappresenta l'andamento del campo magnetico terrestre nel punto dove si effettua la misura). La forma dell'anomalia prodotta da un corpo magnetizzato cambia in base alla latitudine e la determinazione della riduzione al Polo richiede la stima della Declinazione ed Inclinazione rimanenti ed indotte. Diversamente, algoritmi di *boundary analysis*, fra i quali il segnale analitico è il più conosciuto, sono indipendenti dai parametri di magnetizzazione e determinano i margini di una sorgente tramite l'applicazione della trasformata di Hilbert. Molti sono i casi di applicazione di questo algoritmo [Fais et al., 1996; Jeng et al., 2003; Cooper, 2006; Buyuksarac et al., 2006; Pilkington, 2007; Ozgu Arisoy et al., 2007; El-Sadek, 2009]. È dimostrato, comunque, che possono esserci errori significativi sulla stima tramite segnale analitico della posizione di un corpo/sorgente magnetico rispetto alla sua reale ubicazione [Salem et al., 2002].

Viene qui presentato un rilievo magnetometrico ad alta risoluzione effettuato dall'Istituto per l'Ambiente Marino Costiero del CNR di Napoli in due aree antropizzate localizzate nel settore costiero della Campania, cioè nelle zone di Ischia Porto (Isola d'Ischia) e di Torregaveta (Campi Flegrei). Il rilievo magnetico qui presentato è stato effettuato in una fase progettuale preliminare ed in modo propedeutico alle successive fasi di carotaggio, con lo scopo di riscontrare e di cartografare la presenza, nelle aree in studio, di condotte o cavi sottomarini sepolti o affioranti e *target* di più ridotte dimensioni, che avrebbero potuto costituire un rischio per manufatti o persone durante i sondaggi. Scopo ultimo del lavoro è quello di

individuare un tracciato per la posa di un ulteriore cavo marino che dovrà collegare l'Isola di Ischia con il continente. Le fasce dove preferibilmente debba essere ubicato il cavo nelle zone costiere vengono riportate nelle figure 5 e 6. La determinazione di zone prive di sorgenti è stata effettuata, per la zona di Ischia Porto, con l'ausilio di una sovrapposizione delle stime dedotte da segnale analitico e ridotta al polo. Questo tipo di elaborazione *stacked* ha consentito di localizzare con una certa attendibilità le sorgenti.

## 1. Inquadramento geologico

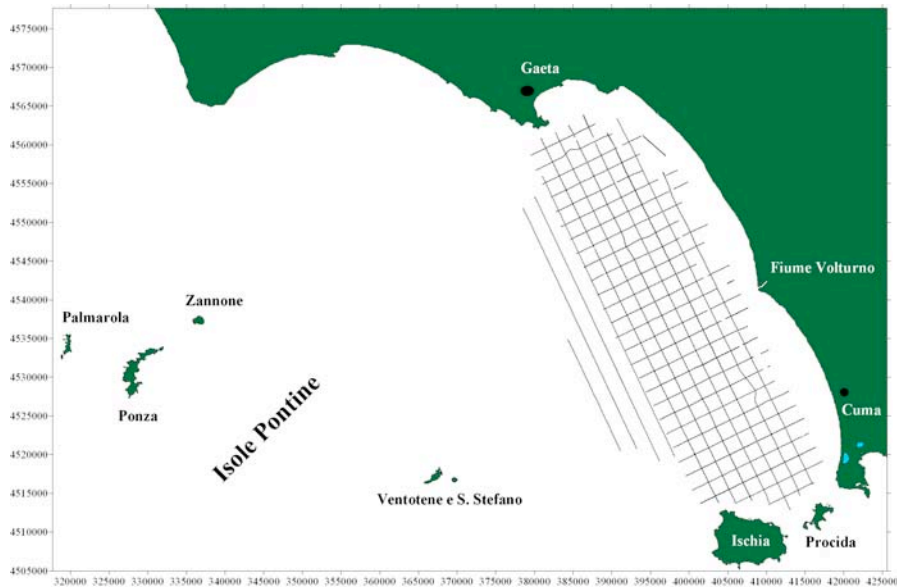
Le aree oggetto di studio (Fig. 1) si trovano all'interno di una zona complessa da un punto di vista vulcanologico e strutturale ad una scala regionale. Questo non condiziona lo scopo del rilievo eseguito, che è quello di riuscire ad evidenziare le anomalie magnetiche a piccola scala riconducibili a soli *target* antropici (condotte e cavi sottomarini sepolti e/o affioranti e *target* di più ridotte dimensioni).



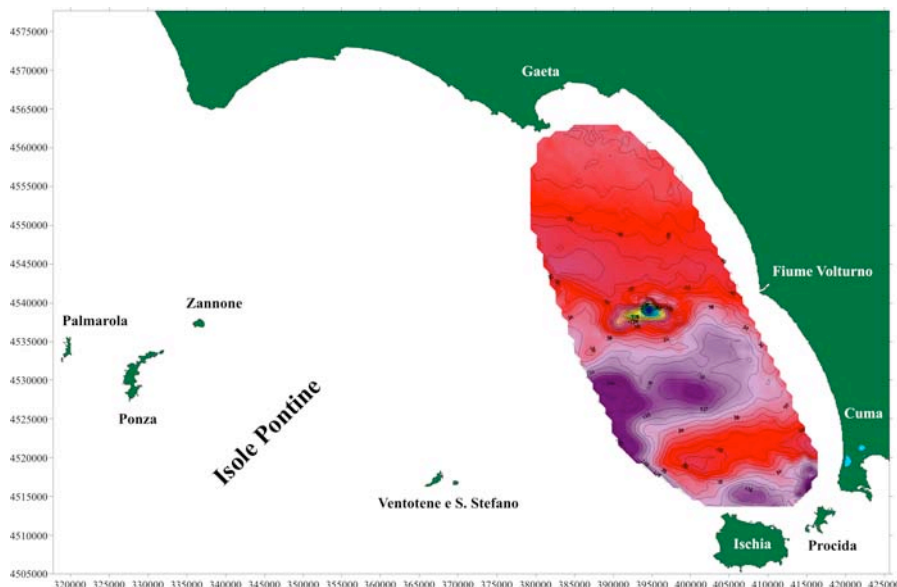
**Figura 1.** Mappa riportante la localizzazione delle aree in studio tra i Campi Flegrei (Torregaveta) e l'Isola d'Ischia (Ischia Porto).

Nonostante la piattaforma continentale tra Ischia ed il Golfo di Gaeta sia relativamente ben nota per quanto riguarda il suo assetto stratigrafico-strutturale, investigato in base all'interpretazione di profili sismici a riflessione multicanale [Bartole et al., 1984; Aiello et al., 2000; Bruno et al., 2000] ed alla correlazione con la geologia delle retrostanti aree emerse, come il Bacino del Volturno [Mariani e Prato, 1988], pochi sono gli studi che hanno utilizzato la magnetometria marina come strumento di analisi integrata dei dati sismici e magnetici [Aiello et al., 2005; de Alteriis et al., 2006]. Tra questi, Aiello et al. [2005] hanno presentato un nuovo rilievo magnetico tra Ischia ed il Promontorio di Gaeta, ottenuto dall'integrazione di due *datasets* di profili magnetici, registrati durante crociere oceanografiche eseguite dall'Istituto per l'Ambiente Marino Costiero del CNR di Napoli a bordo delle N/O Urania e Thetis (Fig. 2). I dati acquisiti sono stati successivamente elaborati e vengono di seguito mostrati (Fig. 3) per fornire un quadro della distribuzione delle anomalie magnetiche ad una scala regionale.





**Figura 2.** Linee di navigazione dei *datasets* magnetici acquisiti tra il Promontorio di Gaeta e l'Isola d'Ischia [da Aiello et al., 2005].

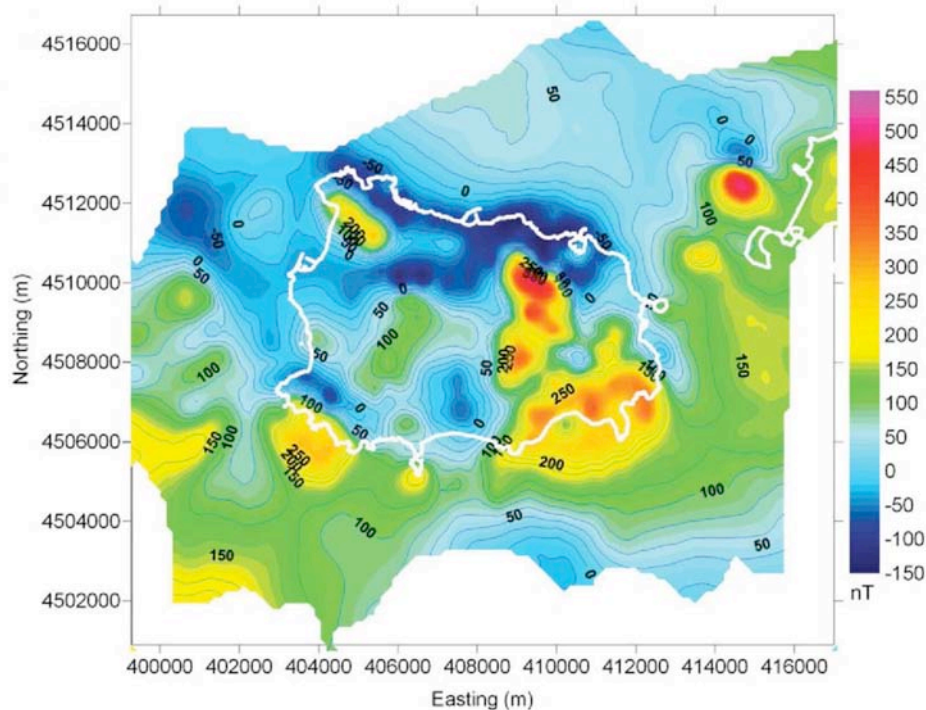


**Figura 3.** Mappa delle anomalie magnetiche tra il Golfo di Gaeta e l'Isola d'Ischia [da Aiello et al., 2005].

Il complesso vulcanico dell'Isola d'Ischia è stato l'oggetto di numerosi studi di geofisica marina e di magnetometria, sia a terra che a mare. I dati magnetici e gravimetrici a terra nell'isola d'Ischia sono stati l'oggetto di uno studio di dettaglio [Nunziata e Rapolla, 1987], condotto alla luce dei dati geologici e vulcanologici recenti per definire un modello delle strutture superficiali e profonde dell'Isola d'Ischia. Dall'interpretazione dei dati gravimetrici risulta che le strutture superficiali sono composte da depositi piroclastici, all'interno dei quali sono interstratificati duomi e flussi lavici di densità più elevata rispetto a quella delle piroclastiti e centri eruttivi riempiti da materiali più recenti di densità più bassa [Corrado e Rapolla, 1981]. Il basamento vulcanico rappresenta un alto strutturale, le cui profondità più superficiali (ricostruite in base alle isoanomale di Bouguer) corrispondono con circa 1 km, a sud del centro dell'isola. Il basamento vulcanico risulta meno magnetizzato sul fianco occidentale dell'isola, probabilmente a causa dello stato termico anomalo dell'area, evidenziato da manifestazioni fumaroliche, sorgenti calde e misure di temperatura eseguite in sondaggi profondi [Penta, 1961].

Paoletti et al. [2009] hanno svolto uno studio geologico-strutturale sull'isola d'Ischia sulla base di dati aeromagnetici e di potenziale spontaneo di alta risoluzione recentemente acquisiti (Fig. 4). I dati magnetici utilizzati dagli autori hanno consentito di localizzare le principali sorgenti di anomalia tramite la *boundary*

*analysis* e di individuare i principali lineamenti geologici dell'isola d'Ischia e del circostante *offshore*. I dati di potenziale spontaneo (SP) hanno invece fornito informazioni sia sugli andamenti strutturali nella caldera risorgente che sulla circolazione dei fluidi ad alta temperatura. Il modello dell'isola d'Ischia è stato costruito in base all'inversione dei dati magnetici e di potenziale spontaneo e sulla base di dati gravimetrici. Il modello è caratterizzato dalla presenza di una struttura ignea, molto probabilmente trachitica, la cui sommità è localizzata ad altezze comprese tra 1200 e 1750 metri sul livello del mare. Tale corpo, presumibilmente formato da varie intrusioni coalescenti, presenta un contrasto di densità con la sovrastante copertura piroclastica di circa  $0.4 \text{ g/cm}^3$  e la sua parte centro-occidentale, al di sotto del Monte Epomeo, non sembra essere magnetizzata. La mancanza di magnetizzazione è probabilmente ricollegabile con gli alti gradienti geotermici misurati in questa porzione dell'isola e potrebbe essere dovuta a processi di alterazione idrochimici o alla presenza di parti fuse all'interno dell'intrusione.



**Figura 4.** Mapa aeromagnetica dell'Isola d'Ischia e dei fondali circostanti [da Paoletti et al., 2009], costruita in base ai dati aeromagnetici acquisiti nell'anno 2005.

L'area di Torregaveta è localizzata nel settore occidentale dei Campi Flegrei, subito ad ovest del Golfo di Pozzuoli. Tale area è localizzata nel settore occidentale della caldera flegrea del Tufo Giallo Napoletano ed è caratterizzata dalla presenza, in affioramento, dei prodotti vulcanici dei centri eruttivi di Baia, Fondi di Baia nord e sud, Averno e dell'Archiaverno e dai centri eruttivi sepolti di Bellavista, Mofete e dal centro locale di Torre Cappella [De Vita et al., 1999; Di Vito et al., 1999; Acocella et al., 1999; Orsi et al., 1999].

Le ricostruzioni vulcanologiche hanno dimostrato che sia i depositi piroclastici affioranti al Monte di Procida che i prodotti del centro vulcanico di Torregaveta sono ascrivibili alla fase eruttiva "post-calderica" ("fase A" di Rosi e Sbrana 1987, di età compresa tra 35.000 e 10.500 y. B.P.). Questi includono prodotti attribuibili a vari centri eruttivi, rinvenuti in affioramento al Monte di Procida, dove risultano interposti tra l'Ignimbrite Campana ed il Tufo Giallo Napoletano. Tra i più importanti c'è il *tephra* di Torregaveta, che è uno strato di scorie latitiche di colore grigio scuro, con intercalazioni di ceneri grigie. Il suo spessore varia da circa 40 m a Torregaveta, in prossimità del centro vulcanico a circa un metro a Miliscola ed è visibile lungo tutta la falesia costiera di Monte di Procida.

Il Vulcano di Torregaveta è localizzato in corrispondenza di una delle faglie bordiere della caldera flegrea. L'attività idromagmatica ha portato alla costruzione di un *tuff cone* composto da breccie tufacee (scorie latitiche all'interno di una matrice gialla litificata). I depositi del Monte di Procida contengono anche *tephra* provenienti da centri non localizzati, rappresentati da strati di pomice con intercalazioni di livelli vulcanici, provenienti probabilmente da centri eruttivi appartenenti alla caldera del Tufo Giallo come

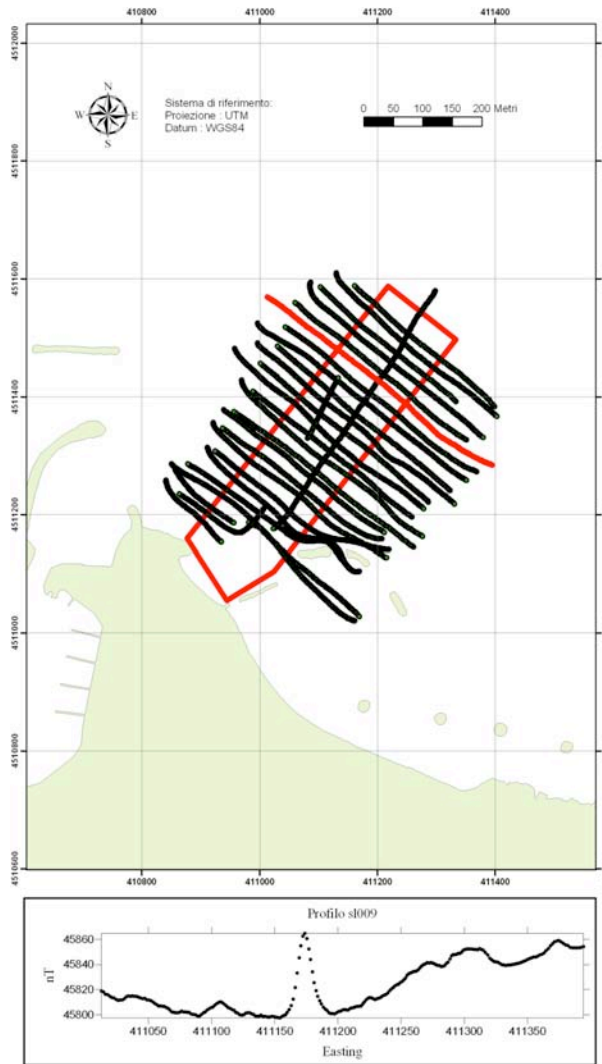
Miseno, Bacoli, Mofete e Archiaverno. In corrispondenza del Monte di Procida è documentata la presenza del bordo della caldera dell'Ignimbrite Campana, ricoperto in discordanza dai prodotti dell'eruzione dei Vulcani di Torregaveta e del Tufo Giallo Napoletano.

## 2. Acquisizione dei dati magnetici

L'acquisizione nella zona di Ischia Porto è stata effettuata il 25/10/2006, a bordo dell'imbarcazione da ricerca GAIA (Ketos), contraddistinta dal ridottissimo pescaggio (25/40 cm) e dotata di sistema di posizionamento di precisione DGPS. La fase di localizzazione è stata curata utilizzando il programma di navigazione PDS2000, il quale interfacciato con il GPS con correzione differenziale, corregge il dato di posizionamento in tempo reale, assicurando un margine d'errore inferiore al metro.

Il magnetometro utilizzato per il rilievo è l'Explorer della Marine Magnetics, caratterizzato da una sensibilità del sensore di 0.02 nT ed una accuratezza assoluta di 0.2 nT; la dotazione del rilevatore di pressione consente di rilevare (e rimuovere in fase di elaborazione) gli effetti dovuti ad eventuali differenze nelle quote di trascinamento del tow-fish. I profili acquisiti a diverse profondità possono essere ricondotti ad una stessa quota di riferimento (in particolare per i rilievi marini si tende a riportare i dati alla quota del livello mare) tramite la 'continuazione nella regione armonica' (*upward o downward continuation*).

Il rilievo (Fig. 5) è articolato in 28 profili, per una estensione lineare complessiva di circa 10 Km (9647 m), sviluppati in un'area di 500 X 550 metri circa. I profili hanno orientamento prevalente N45°W. Due profili N45°E sono stati acquisiti ed utilizzati per il calcolo degli incroci. La durata complessiva dell'acquisizione è di circa 2.5 ore, con una media di velocità dell'imbarcazione in acquisizione pari a poco meno di 2.5 nodi. I dati così trattati hanno consentito (tramite interpolazione) la generazione di un *grid* con passo di cella di 10X10 m e avente estensione complessiva di 200.000 mq circa. In figura 5 viene riportato a titolo di esempio anche il profilo magnetico sl009, che nella figura principale viene raffigurato in rosso.



**Figura 5.** Grigliato di acquisizione del rilievo magnetico di alta risoluzione eseguito ad Ischia Porto (Isola d'Ischia) con in rosso evidenziato il profilo s1009 per il quale viene riportato il profilo magnetico in basso. In rosso l'area dove dovrebbe essere ubicato il nuovo cavo.

L'acquisizione dei dati magnetici nella zona di Torregaveta è stata eseguita il 26/10/2006, a bordo dell'imbarcazione da ricerca GAIA (Ketos). Il rilievo è articolato in 29 profili, per una estensione lineare complessiva di circa 25 Km (24830 m). I profili hanno orientamento prevalente NS (Fig. 6), fatta eccezione per due profili perpendicolari (con orientamento EW) utilizzati per il calcolo degli incroci. L'area di acquisizione misura complessivamente 700X900 metri, mentre i dati interpolati hanno permesso una copertura significativa di circa 500.000 mq, con un *grid* con passo di cella di 10X10 metri. In figura 6 viene riportato a titolo di esempio anche il profilo magnetico s1022, che nella figura principale viene raffigurato in rosso.



**Figura 6.** Grigliato di acquisizione del rilievo magnetico di alta risoluzione eseguito a Torregaveta (Campi Flegrei) con in rosso evidenziato il profilo sl022 per il quale viene riportato il profilo magnetico in basso. In rosso la fascia dove dovrebbe essere ubicato il nuovo cavo.

### 3. Elaborazione dei dati magnetici

I dati acquisiti sono stati pre-elaborati con l'applicazione delle correzioni standard di *layback* sui profili, di correzione della variazione diurna, leveling e sottrazione del campo di riferimento IGRF al fine di estrapolare le anomalie del campo magnetico totale (Fig. 12 e 17).

La correzione di *layback* ha consentito di annullare la differenza fra la posizione dell'antenna del sistema DGPS e la reale posizione del *towfish*, trainato a circa 30 metri dall'imbarcazione. E' stato quindi effettuato il riposizionamento dei punti di navigazione, tenendo in considerazione l'*offset* tra il pesce ed il sistema di posizionamento DGPS. E' stata poi effettuata la correzione standard di riduzione temporale diurna per la quale sono stati utilizzati i dati forniti dall'Osservatorio Geomagnetico dell'Aquila dell'INGV non avendo avuto la possibilità di collocare una stazione in prossimità delle aree di acquisizione; tuttavia, nei giorni in cui sono stati effettuati i rilievi, l'andamento del campo magnetico terrestre è risultato essere quieto. Successivamente è stato eseguito il *leveling* statistico, che consiste nella rimozione delle variazioni magnetiche a corto periodo, sugli errori rilevati nella distribuzione degli *shift* agli incroci dei profili, al fine di ridurre gli scarti al minimo valore possibile; questo tipo di elaborazione è stata effettuata solo sul dataset di Torregaveta, in quanto per Ischia Porto il dataset acquisito fornisce una sola traversa sufficientemente lunga (ne sarebbero necessarie almeno due) che potrebbe essere utilizzata per tale scopo. Infine, la sottrazione del campo geomagnetico di riferimento (IGRF), al fine di estrapolare le anomalie del campo

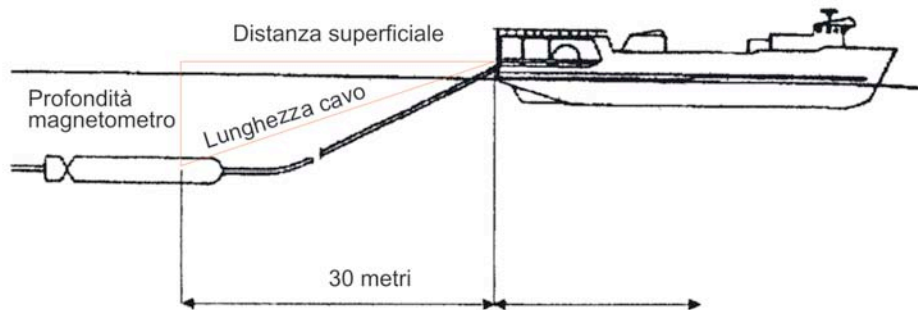
magnetico totale. Il valore medio del Campo IGRF è stato calcolato (per l'anno 2006) con l'utilizzo del software Magpick (Geometrics). Tale valore medio è stato sottratto alla matrice di valori ottenuta dai profili magnetici interpolati [Mandea e Macmillan, 2000].

Allo scopo di ottimizzare l'elaborazione indirizzata alla ricerca dei *target*, per la zona di Ischia Porto, si è preferito rafforzare l'interpretazione effettuando uno *stack* degli allineamenti desunti da singole applicazioni di algoritmi (segnale analitico e ridotta al polo) sui dati preprocessati; sono stati poi tracciati, gli allineamenti preferenziali riconducibili a condotte e cavi sottomarini.

### 3.1 Metodiche utilizzate per il *pre-processing*

#### 3.1.1 Correzione di *offset* o di *layback*

Nelle acquisizioni magnetometriche marine i sistemi di posizionamento forniscono le coordinate relative alla posizione dell'antenna che riceve il segnale (GPS o DGPS), normalmente situata al centro della nave, mentre il magnetometro viene trainato "a cavo" ad una distanza che deve essere circa tre volte la lunghezza dell'imbarcazione, in modo da ridurre o annullare l'effetto magnetico legato alla presenza dello scafo (Fig. 7).



**Figura 7.** Schema mostrante il trascinamento del magnetometro marino a poppa della nave oceanografica durante l'acquisizione dei dati, utile per la comprensione della correzione di *layback* applicata ai dati magnetometrici di Ischia e Torregaveta.

Per quanto riguarda la correzione di *layback*, ossia la traslazione dinamica dei dati di posizionamento istante per istante sul punto dove si trova il magnetometro ossia sul punto esatto dove si effettua la misura, si può affermare che traslazioni nel piano XY di alcune decine di metri possono risultare significative, soprattutto in zone caratterizzate da repentine variazioni di intensità del segnale magnetico. Una tale variazione, infatti, può influenzare forma e disposizione delle anomalie magnetiche; inoltre, il tipo di interpolazione effettuato (regressione dei punti sulle traiettorie effettivamente percorse dall'imbarcazione) garantisce un accesso più semplice ai dati, contrariamente a quanto si sarebbe ottenuto con una traslazione costante di tutta la navigazione. Questa correzione, ovviamente, possiede una polarità, cioè deve essere effettuata in verso opposto a quello di percorrenza.

#### 3.1.2 Controllo degli incroci

Uno dei controlli standard per la verifica della qualità del segnale consiste nella misura della differenza fra i valori all'intersezione fra due profili di acquisizione; è chiaro che il segnale sarà da considerare tanto più affidabile quanto più gli scarti agli incroci saranno prossimi allo zero.

Per ogni incrocio sono state calcolate:

- La differenza fra i valori dei due punti più vicini.
- La differenza fra le interpolazioni lineari dei valori magnetici, relativa al punto fittizio di navigazione (calcolato, anch'esso, tramite interpolazione lineare delle coordinate precedente e successiva all'incrocio).

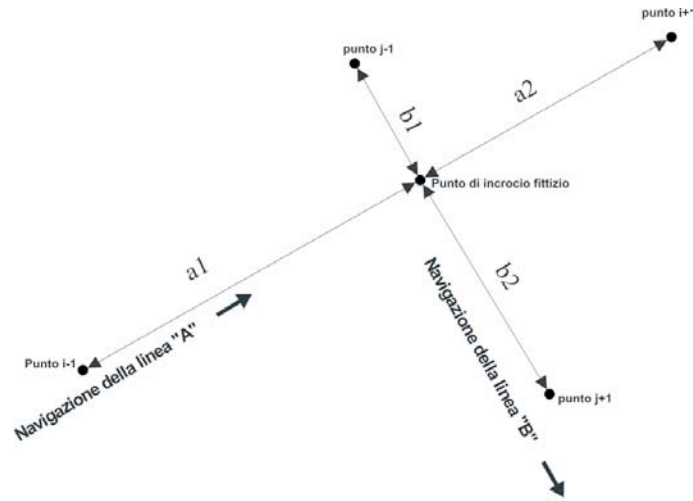
Nel secondo caso, in particolare, la differenza rilevata rappresenta la differenza fra le medie ponderate dei valori secondo l'equazione:

$$\Delta Z = \left[ (z_{i-1} \times \frac{a_2}{a_1 + a_2}) + (z_{i+1} \times \frac{a_1}{a_1 + a_2}) \right] - \left[ (z_{j-1} \times \frac{b_2}{b_1 + b_2}) + (z_{j+1} \times \frac{b_1}{b_1 + b_2}) \right]$$

dove:

$Z$ =valore del campo nei punti  $j+1$  e  $j-1$  (Fig.8)

$a, b$ =distanze tra i punti  $j+1$  e  $j-1$  rispetto al punto fittizio di incrocio



**Figura 8.** Esempio di incrocio.

### 3.2 Algoritmi di processing utilizzati

#### 3.2.1 Continuazione nella regione armonica

A causa della natura stessa del campo magnetico, quest'ultimo, nella zona armonica (ovvero priva di sorgenti), può essere estrapolato ad una qualsiasi quota, al di sopra o al di sotto del piano di acquisizione (*upward* o *downward continuation*).

In base al teorema di Green ed alla seguente relazione [Fedi e Rapolla, 1990]:

$$U(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \int_S U(\xi, \eta, 0) \frac{z}{((x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2)^{3/2}} d\xi d\eta \quad (\text{eq.1})$$

dal campo misurato su una superficie ad una determinata quota  $Z$  si può ottenere il campo ad un livello  $Z_1 \neq Z$ . L'equazione 1 è scritta nella forma degli integrali di convoluzione dove:

$S$ =superficie di misura

$Z$ =parametro

$\xi$  e  $\eta$  indicano che il sistema è indipendente da  $x$  e  $y$ , ossia, applicando un operatore lineare  $\Gamma$  ad una funzione  $F \Rightarrow \Gamma[F(x - \xi, y - \eta)] = G(x - \xi, y - \eta)$

L'equazione 1 può essere scritta in termini di convoluzione tra funzioni:

$$U(x, y, z) = U(x, y, 0) * R(x, y, z) \quad \text{con}$$

$$R(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \frac{z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \quad (\text{eq.2})$$

Per il teorema della convoluzione, applicando la trasformata di Fourier, si passa nel dominio delle frequenze e l'equazione 2 diventa:

$$\tilde{U}(\alpha, \beta, z) = \tilde{U}(\alpha, \beta, 0) \cdot \tilde{R}(\alpha, \beta) \quad (\text{eq.3})$$

con

$$\tilde{R}(\alpha, \beta) = e^{-\vartheta z} \quad \text{che è l'operatore di filtraggio per } z > 0, \text{ con}$$

$$\vartheta = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$$

Questo processo viene usato come tecnica di filtraggio passa-bassa (se la continuazione è intesa verso l'alto) o passa-alta (verso il basso) dei dati. Analizzando il campo continuato verso il basso si può evincere l'effetto delle sorgenti poco profonde sul campo di anomalie magnetiche residue, ottenendo l'eliminazione di eventuali andamenti regionali.

Da un punto di vista teorico la continuazione verso il basso (ossia per  $z < 0$ ) è realizzabile a patto di non continuare il campo a quote inferiori alla minima profondità delle sorgenti, ovvero in tutta la regione armonica. È ormai provato, comunque, che questo processo è fortemente instabile, in quanto esalta il rumore e rende instabile il campo, tuttavia può essere attuato con l'utilizzo di alcuni parametri di "normalizzazione".

### 3.2.2 Equazione di Poisson

La seguente equazione:

$$V = -\frac{JdU}{G\sigma dl}$$

dimostrata da Poisson, rappresenta la correlazione generale fra i potenziali magnetico e gravimetrico. In questa equazione:

V = Potenziale magnetico

U = Potenziale gravitazionale

$\sigma$  = Contrasto di densità

J = Contrasto di magnetizzazione

dl = Derivata del vettore di magnetizzazione (lungo la direzione di magnetizzazione i)

La grandezza individuata dalla derivata prima di questa equazione prende il nome di trasformata Pseudogravimetrica, mentre con la derivata seconda si ottiene la ben nota trasformata funzionale di Riduzione al polo.

### 3.2.3 Riduzione al polo (RTP)

La trasformazione funzionale di riduzione al polo viene definita nel dominio delle frequenze dalla relazione:

$$R_{R.P.} = \frac{\sigma^2}{[\sigma h_1 + j(\alpha h_x + \beta h_y)][\sigma t_2 + j(\alpha t_x + \beta t_y)]}$$

dove j è l'unità immaginaria.

Questa trasformazione ha l'effetto di eliminare la dipendenza della forma di un'anomalia dalla latitudine. Nel caso di anomalie prive di interferenze, l'effetto più importante della RTP è quello di rendere concentrica l'anomalia rispetto alla sorgente. La RTP richiede la conoscenza pregressa dei parametri di Inclinazione e Declinazione locali del CMT, facilmente calcolabili tramite un modello matematico del campo, quale ad esempio l'IGRF, nonché la conoscenza di Inclinazione e Declinazione relativi alla sorgente. Queste ultime possono essere differenti dalle precedenti: è questo il caso in cui la sorgente sia stata sottoposta a deformazioni o rotazioni di origine tettonica, oppure il corpo magnetizzato si sia messo in posto in corrispondenza di un'epoca di inversione magnetica. Normalmente, i parametri relativi alla direzione della magnetizzazione vengono calcolati mediante un processo iterativo che prevede vari tentativi di RTP,



effettuati partendo dai valori di I e D locali, per poi valutarne le variazioni prodotte dalla graduale differenziazione.

### 3.2.4 Segnale analitico

Si tratta di una metodologia di elaborazione 2D o 3D (incentrata sulla trasformata di Hilbert) caratterizzata dal computo di una grandezza complessa, il cui modulo coincide con quello del gradiente del campo di anomalie. Essa è indipendente dai parametri di magnetizzazione e presenta i suoi massimi lungo i bordi della sorgente, definendone i limiti. Definendo  $\hat{x}$ ,  $\hat{y}$ ,  $\hat{z}$  come vettori unitari (versori) lungo gli assi x, y e z del sistema di riferimento, il segnale analitico in 3-D dell'anomalia M del campo di potenziale può essere scritto come [Roest et al., 1992]:

$$A(x, y) = \left( \frac{\partial M}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial M}{\partial y} \hat{y} + i \frac{\partial M}{\partial z} \hat{z} \right)$$

Applicando a questa relazione la trasformata di Fourier 2-D, definita come:

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-i(k_x x + k_y y)}$$

si ottiene l'espressione dell'equazione nel dominio delle frequenze in termini di gradiente della trasformata di Fourier del campo magnetico:

$$\hat{t}F[A(x, y)] = \hat{h}\nabla F[M] + i\hat{z}\nabla F[M]$$

dove :

$\nabla =$  operatore gradiente

$$\hat{t} = [\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}]$$

$$\hat{h} = [\hat{x}, \hat{y}]$$

La parte reale di questa equazione è costituita dalle derivate orizzontali dell'anomalia; la parte immaginaria dal gradiente verticale. Il modulo del segnale analitico, calcolato come:

$$|A| = \left| \left[ \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial F}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial F}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2} \right|$$

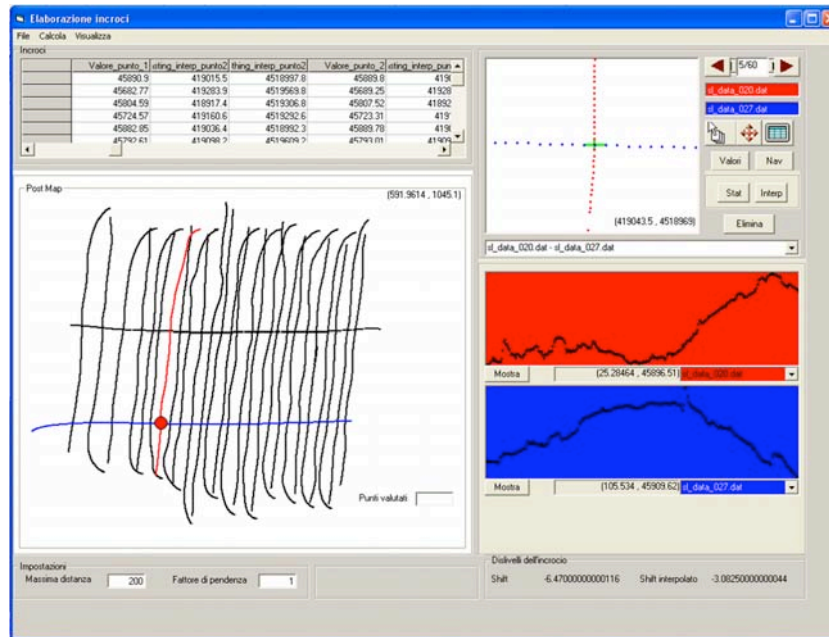
prende il nome di ampiezza (o involuppo) del segnale analitico.

I massimi del segnale analitico normalmente si rinvengono in corrispondenza di contatti litologici o faglie dirette, e sono indipendenti dai parametri di direzione di magnetizzazione indotta o rimanente delle sorgenti [Hsu et al., 1996].

## 4. Risultati

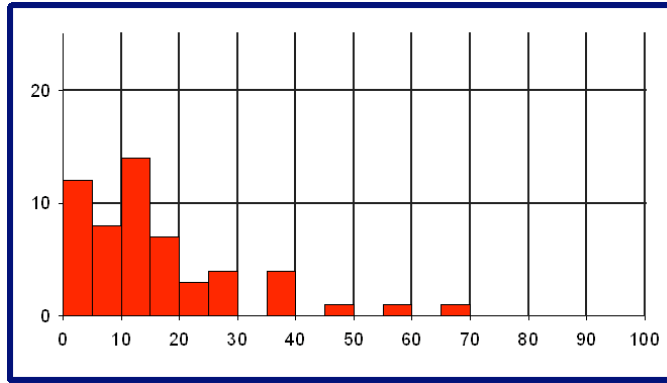
### 4.1 Ischia Porto

I dati magnetici, per quanto concerne l'eliminazione degli spikes, il controllo dei percorsi di navigazione ed il controllo degli errori, sono stati trattati con un programma specifico compilato dagli autori. Il software è stato appositamente creato in ambiente Visual Basic 6.0; esso è in grado di gestire con semplicità la mappa delle navigazioni e permette di editare gli incroci singolarmente, per gruppi o di gestirli tutti simultaneamente. L'interfaccia è connessa ad un database in formato Microsoft Access; in figura 9 viene mostrata come esempio la schermata della *tool* relativa all'elaborazione degli incroci.

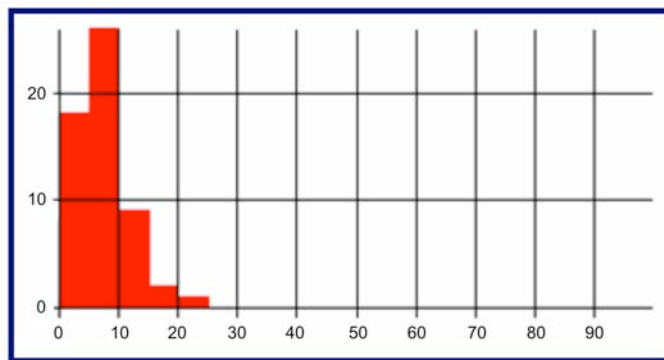


**Figura 9.** Schermata della *tool* relativa alla elaborazione degli incroci tratta dal software compilato degli autori.

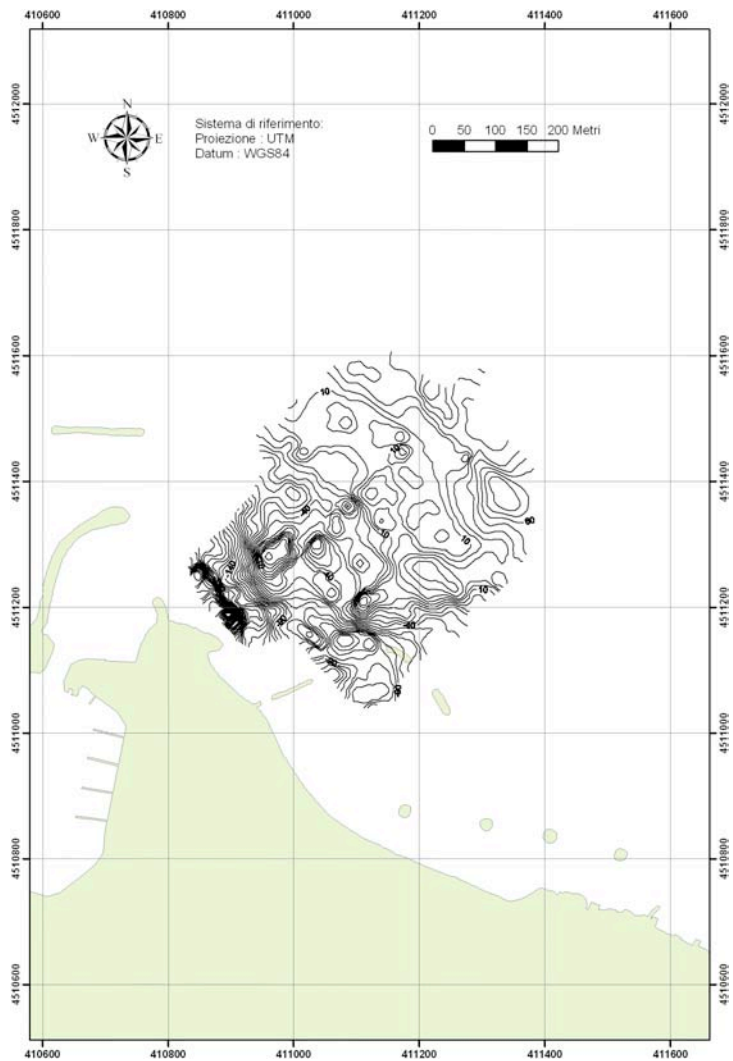
La distribuzione degli *shift* agli incroci sui dati *raw* risulta variabile tra 0 e 70 distribuiti in maniera casuale con gli errori maggiori in valore assoluto comunque meno presenti rispetto ai valori prossimi allo 0 (Fig. 10). La distribuzione, dopo la sola correzione di *layback* e correzione diurna, risulta invece variabile fra 0 e 25 nT circa, con un picco nel range 0-5 nT (Fig. 11). I dati originali sono stati interpolati con passo di cella 10X10 metri. L' algoritmo utilizzato per l' interpolazione è il Kriging, in particolare è stato adottato il Kriging ordinario non avendo riscontrato significative variazioni della media nei dati nelle varie zone di acquisizione; l' interpolazione è stata effettuata per punti, con passo di cella 10X10 metri, utilizzando un modello di variogramma lineare. La necessità (legata alle routine utilizzate in fase di elaborazione; Phillips et al., 1993) di operare su matrici costituite da numeri di righe e colonne pari a potenze di 2 (necessità connessa alla natura degli algoritmi ed alle trasformate di Hilbert e DFT operate) ci ha spinto a reinterpolare linearmente le matrici inserendo nodi fra i valori ottenuti dall' interpolazione. Tale passaggio porta ad un incremento dei punti che non determina variazioni significative nel contenuto del segnale (ovvero, si è passati ad una matrice con spaziatura 2.5X2.5 m senza variazioni nel contenuto in frequenza del segnale). In figura 12 viene mostrata la carta delle anomalie magnetiche residue, dalla quale si riesce a riconoscere (non del tutto chiaramente) un allineamento con orientamento N40E ed uno con orientazione N60E nella zona al bordo inferiore del rilievo; la parte più vicina a costa, nei pressi dell' imboccatura del porto, risulta molto caotica ed è difficile individuarvi target puntuali. Man mano che si procede verso NE il rilievo sembra essere caratterizzato da alcune anomalie casuali. In figura 13 è invece rappresentata la mappa del segnale analitico che mostra chiaramente due *pattern* preferenziali rettilinei circa paralleli con orientazione N40°E ed il terzo *pattern* localizzato nella parte inferiore del rilievo. In figura 14 è infine rappresentata la mappa ottenuta dallo *stack* delle elaborazioni (segnale analitico e ridotto al polo) dalla quale sono stati riconosciuti tre allineamenti principali.



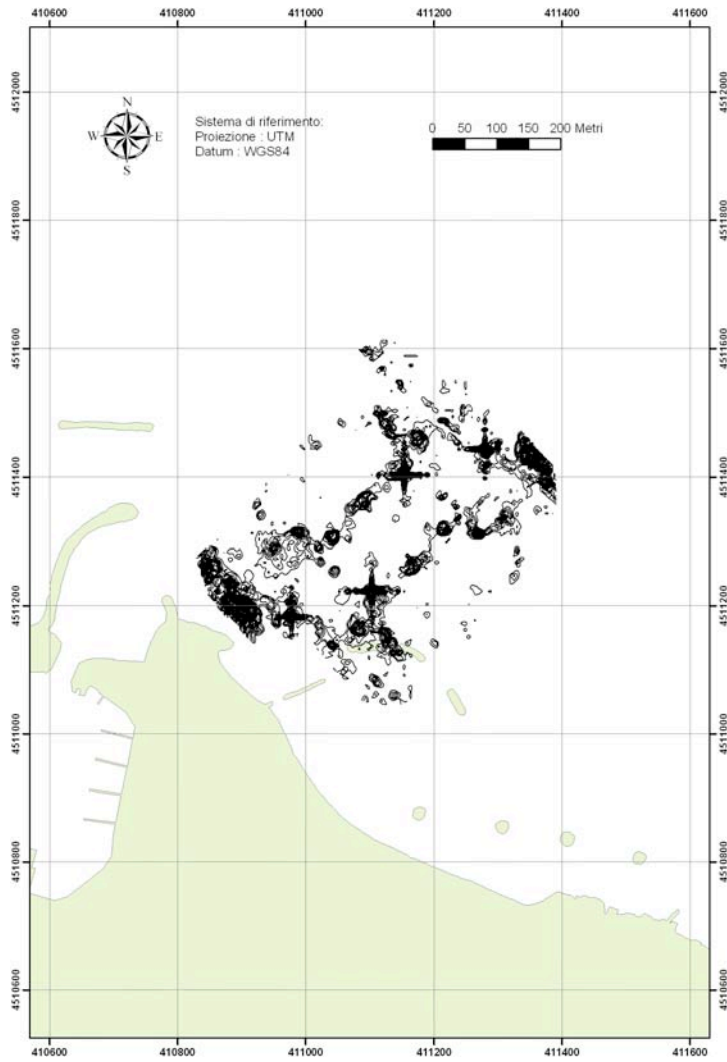
**Figura 10.** Distribuzione modale degli incroci calcolati per il database di Ischia Porto sui dati *raw*.



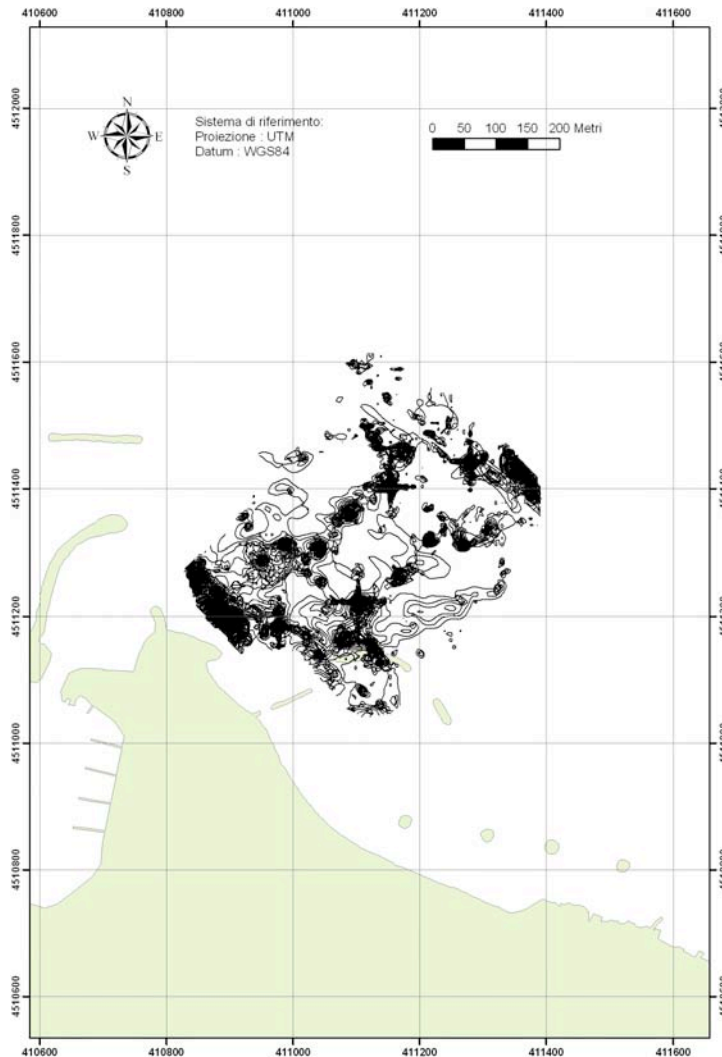
**Figura 11.** Distribuzione modale degli incroci calcolati per il database di Ischia Porto dopo la correzione di *layback* e diurna.



**Figura 12.** Carta delle anomalie magnetiche residue nella zona di Ischia Porto (Isola d'Ischia).



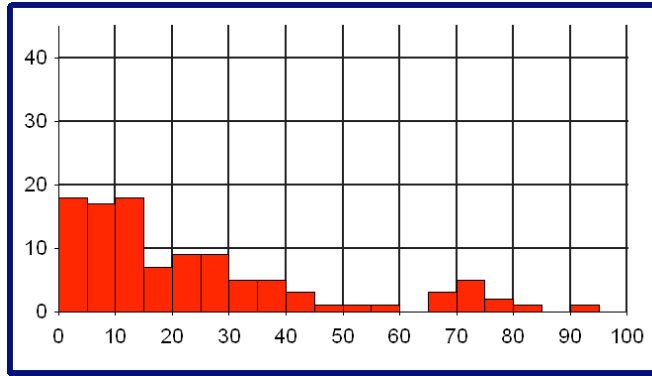
**Figura 13.** Carta del segnale analitico nella zona di Ischia Porto (Isola d'Ischia). Si noti la presenza di due allineamenti principali N40°E.



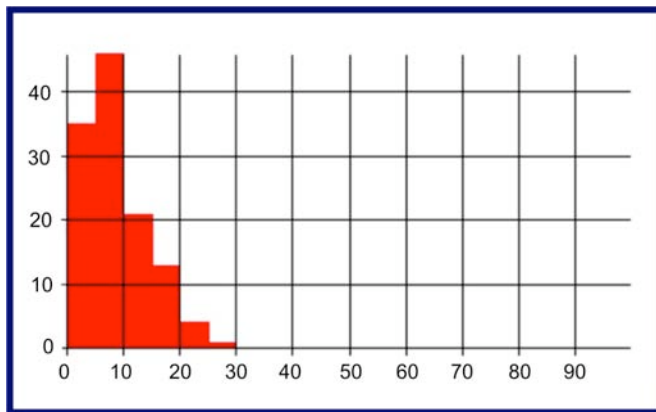
**Figura 14.** Carta dello *Stack* delle elaborazioni. Si noti come i due allineamenti principali N40°E possano essere affiancati da almeno un altro allineamento circa parallelo a sud.

## 4.2 Torregaveta

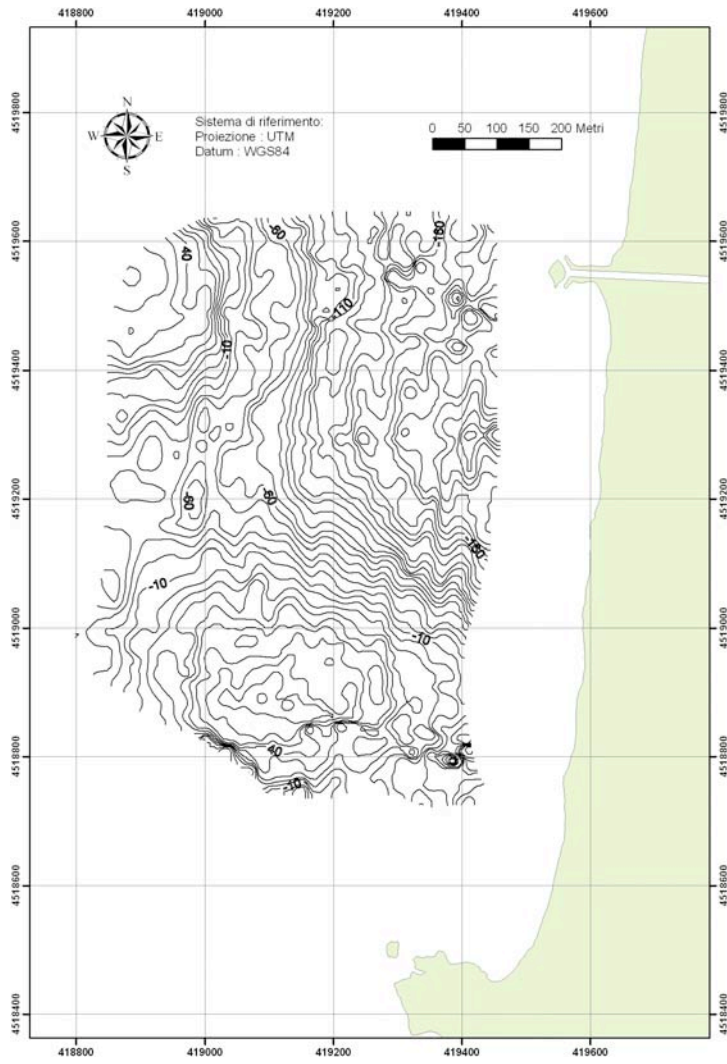
Nel caso di studio di Torregaveta la matrice interpolata con passo 10X10 metri è stata sottoposta ad interpolazione lineare, come descritto nel paragrafo precedente. La distribuzione degli *shift* agli incroci sui dati *raw* risulta variabile tra 0 e 95 distribuiti in maniera casuale con gli errori maggiori in valore assoluto comunque meno presenti rispetto ai valori prossimi allo 0 (Fig. 15). La distribuzione dopo le correzioni è risultata invece variabile fra 0 e 30 nT circa, con un picco nel range 0-5 nT (Fig. 16). In figura 17 viene mostrata la carta delle anomalie magnetiche residue. La carta delle anomalie mostra dei *pattern* preferenziali poco marcati con orientazione N75°W, mentre tutta la zona sembra essere molto meno caotica dal punto di vista magnetico rispetto a quella di Ischia Porto. Gli allineamenti sono visibili in modo molto più netto nelle elaborazioni successive, ovvero nelle carte del segnale analitico (Fig. 18) e della ridotta al polo (RTP); quest'ultima è stata rappresentata in termini di rilievo ombreggiato, che ha prodotto ottimi risultati per il riconoscimento delle condotte sottomarine (Fig. 19). Le elaborazioni tramite segnale analitico e ridotta al polo mostrano chiaramente la presenza di almeno sei allineamenti, oltre ad anomalie apparentemente del tutto casuali situate verso costa nella parte centrale del rilievo. Il rapporto segnale/disturbo sembra molto migliore rispetto al caso di Ischia Porto.



**Figura 15.** Distribuzione modale degli incroci calcolati per il database di Torregaveta sui dati *raw*.

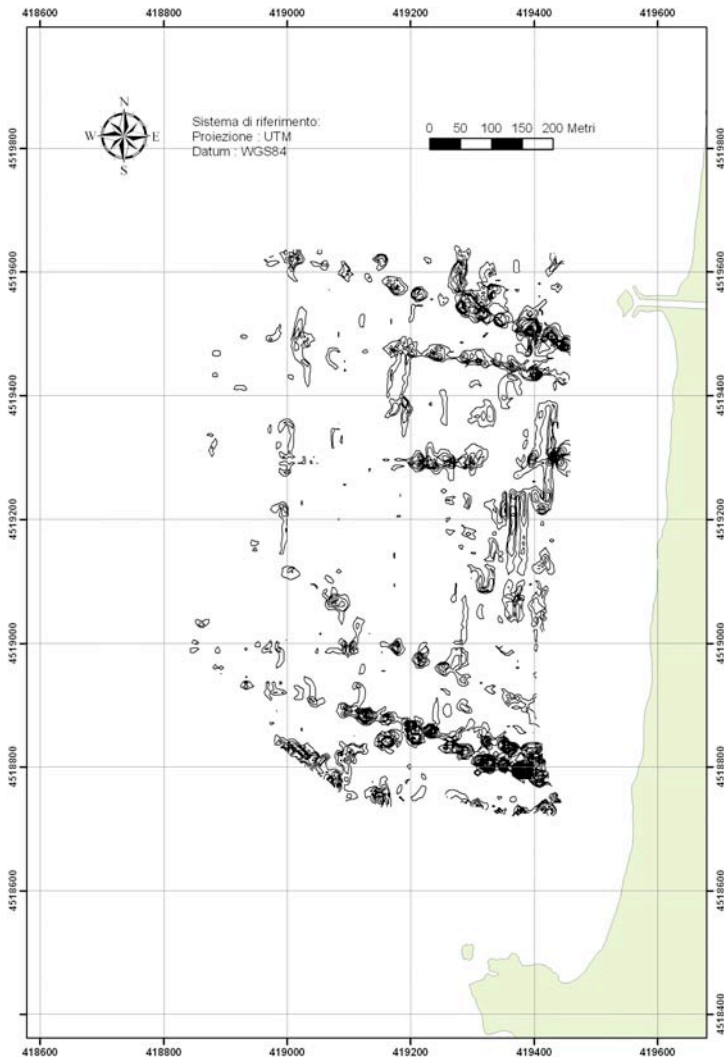


**Figura 16.** Distribuzione modale degli incroci calcolati per il database di Torregaveta dopo le correzioni.

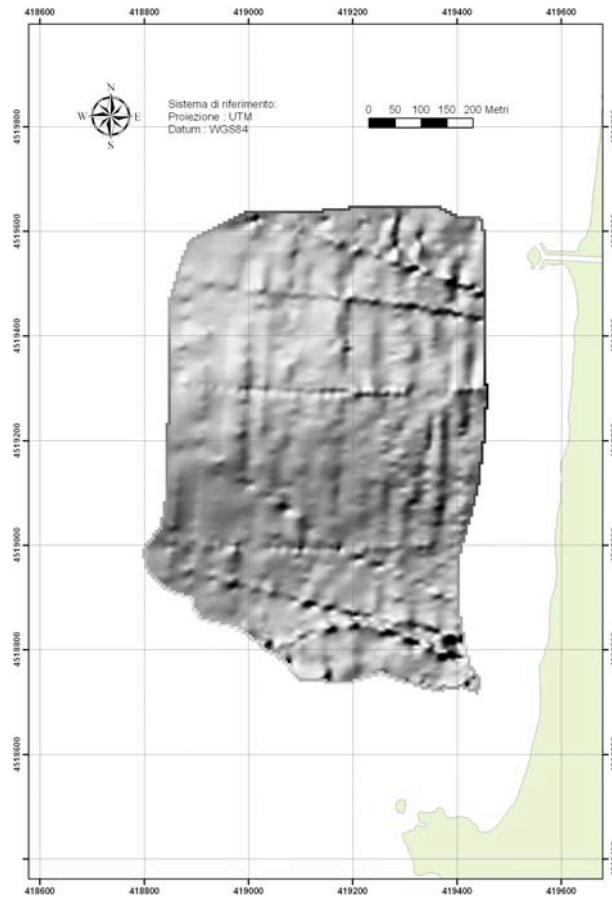


**Figura 17.** Carta delle anomalie magnetiche residue nella zona di Torregaveta (Campi Flegrei).





**Figura 18.** Carta del segnale analitico nella zona di Torregaveta (Campi Flegrei).

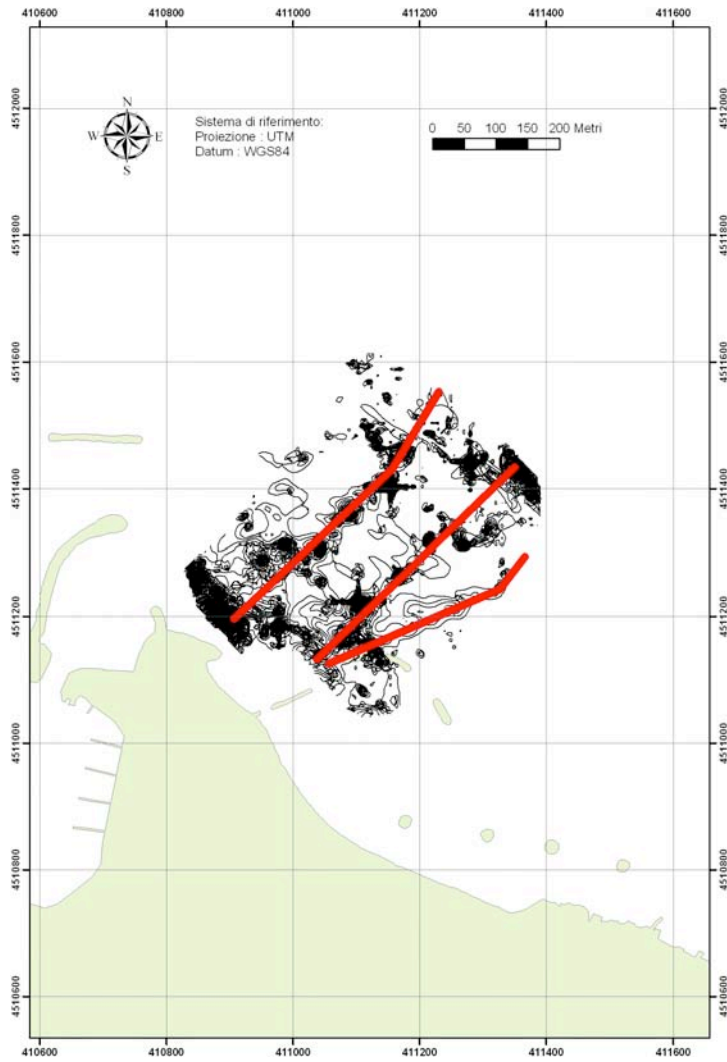


**Figura 19.** Carta della rappresentazione, sotto forma di rilievo ombreggiato, della ridotta al polo del campo di anomalie magnetiche residue.

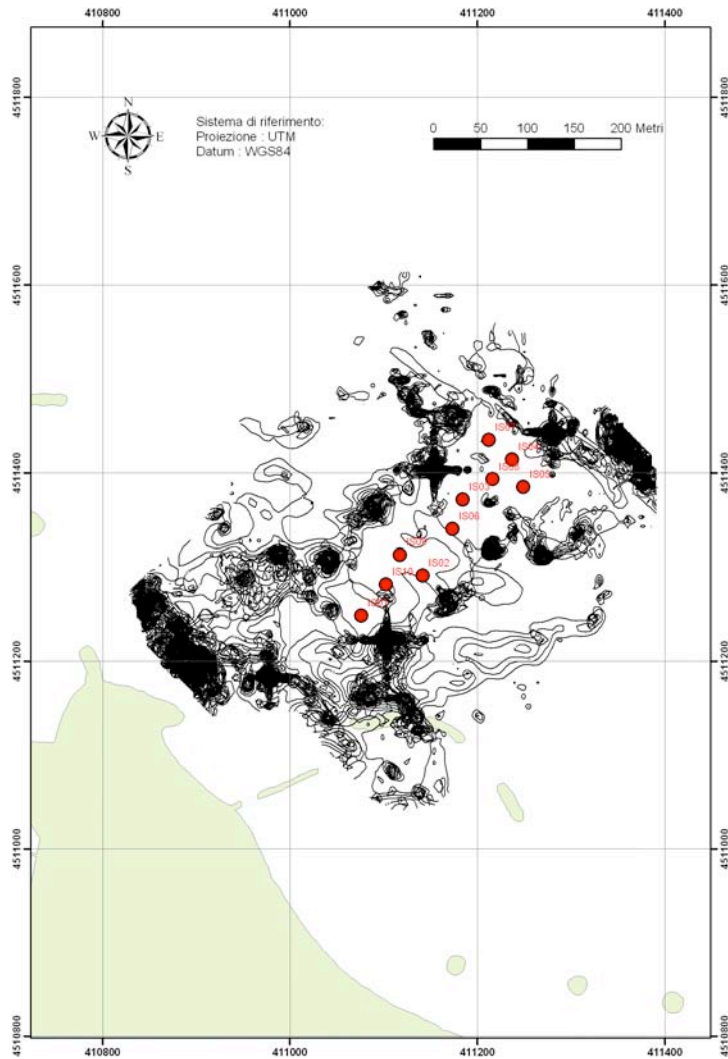
## 5. Conclusioni

La produzione delle mappe è stata dunque finalizzata all'individuazione delle condotte e dei cavi sottomarini oltre a target di più ridotte dimensioni (pochi metri); per quanto riguarda questi ultimi, a causa dell'assenza di rilievi Sidescan Sonar e/o Subbottom Chirp, eseguiti sulle stesse linee di navigazione della magnetometria, possono essere fatte solo delle ipotesi sulla loro natura; difatti, l'individuazione delle zone di *vuoto* magnetico da utilizzare per la successiva localizzazione dei carotaggi, è stata comunque possibile in maniera efficace in entrambe le aree di studio.

In figura 20 viene visualizzata la mappa degli *stack* delle elaborazioni riportante i tracciati delle condotte desunti in base alla mappa di figura 14. La zona migliore per l'ubicazione dei vibrocarotaggi, riportati in figura 21, sembra essere quella centrale, che ottempera alle disposizioni del progetto.

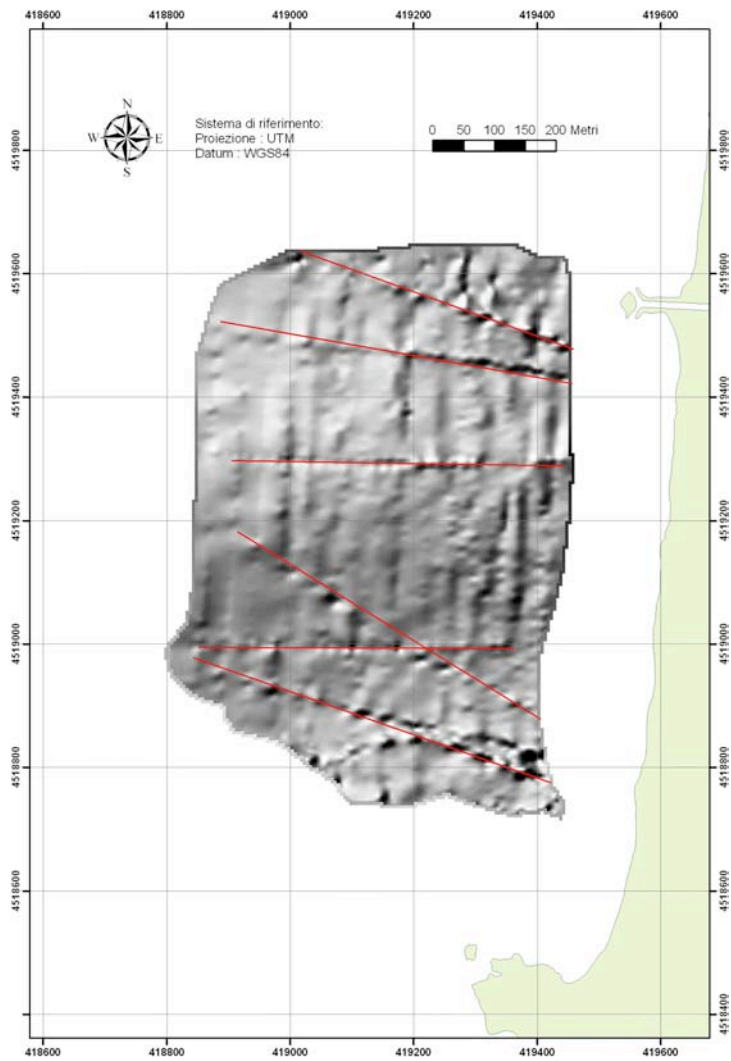


**Figura 20.** Carta dello *Stack* delle elaborazioni per Ischia Porto. In rosso sono rappresentate le condotte presenti al fondo mare individuate in base all'elaborazione.

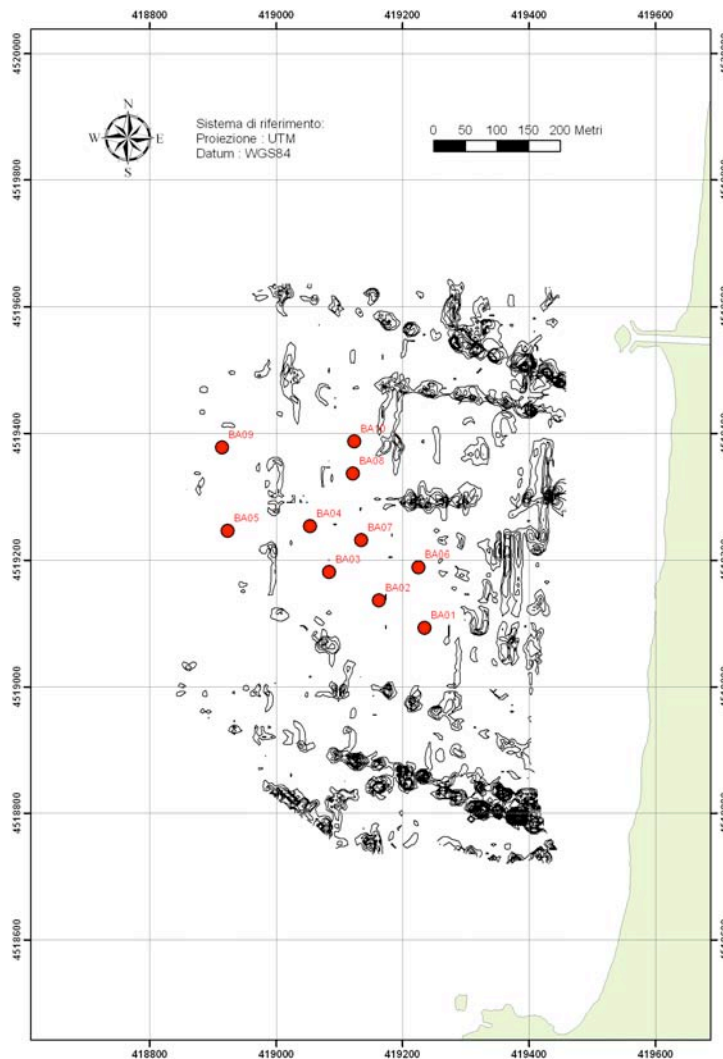


**Figura 21.** Carta dello *Stack* delle elaborazioni per Ischia Porto riportante in rosso la localizzazione dei punti di carotaggio.

Per Torregaveta il *picking* degli allineamenti preferenziali è stato eseguito sulla carta della ridotta al polo del segnale, raffigurata tramite rilievo ombreggiato (Fig. 22). Sono stati riconosciuti 6 allineamenti principali riconducibili a condotte e cavi sottomarini. L'area migliore per posizionare i vibrocarotaggi è raffigurata in figura 23 in accordo con le disposizioni di progetto.



**Figura 22.** Esempio di *picking* degli allineamenti principali sulla carta, sotto forma di rilievo ombreggiato, della ridotta al polo del campo di anomalie magnetiche.



**Figura 23.** Carta del segnale analitico nella zona di Torregaveta (Campi Flegrei) riportante in rosso la localizzazione dei punti di carotaggio.

Per quanto riguarda il metodo per la campinatura dei sedimenti, è stato utilizzato il vibrocarotaggio, una tecnica efficiente e versatile, che consente di ottenere carote lunghe ed indisturbate, in sedimenti consolidati e saturi d'acqua. Tale tecnica è utilizzabile in porti, laghi e fiumi, oppure a terra su terreni saturi d'acqua (spiagge, terreni paludosi) e consente una penetrazione profonda e veloce laddove altre tecniche di campionatura, come il carotaggio a rotazione, risulterebbero di attuazione complessa ed anti-economiche. Il vibrocarotaggio risulta quindi ottimale per indagini di tipo geognostico e per il prelievo di campioni destinati ad analisi chimiche, fisiche e biologiche; in particolare si adatta molto bene ai prelievi di sedimento previsti dai programmi di caratterizzazione ambientale, che seguono le direttive del D.M. 471, o comunque le linee guida dettate in materia dall'ISPRA (ex ICRAM).

Il funzionamento del vibrocarotiere si basa su un meccanismo vibrante o *vibrohead*, alimentato da una sorgente elettrica esterna, che è montato all'estremità superiore di un tubo in acciaio denominato "camicia" o *core tube*. Quest'ultimo penetra nei sedimenti spinto dalla forza di gravità e dall'azione vibrante. Qualora la penetrazione è completata, il vibrocarotiere viene spento e la carota di sedimento viene estratta tramite il mezzo di sollevamento di bordo. Durante il carotaggio il sedimento penetra all'interno del *liner*, ossia di un tubo in materiale plastico posto all'interno della camicia. In fase di sfangamento una valvola *corecatcher* trattiene il sedimento all'interno del *liner*. Dopo il recupero a bordo del sistema di campionatura, il *liner* contenente la carota viene estratto ed instradato per le successive operazioni di estrazione carota e di prelievo campioni.

Il posizionamento dei punti di campionatura è stato effettuato in base alle mappe riportanti le varie elaborazioni nelle zone di vuoto magnetico ritenute sicure per lo svolgimento di tale attività.

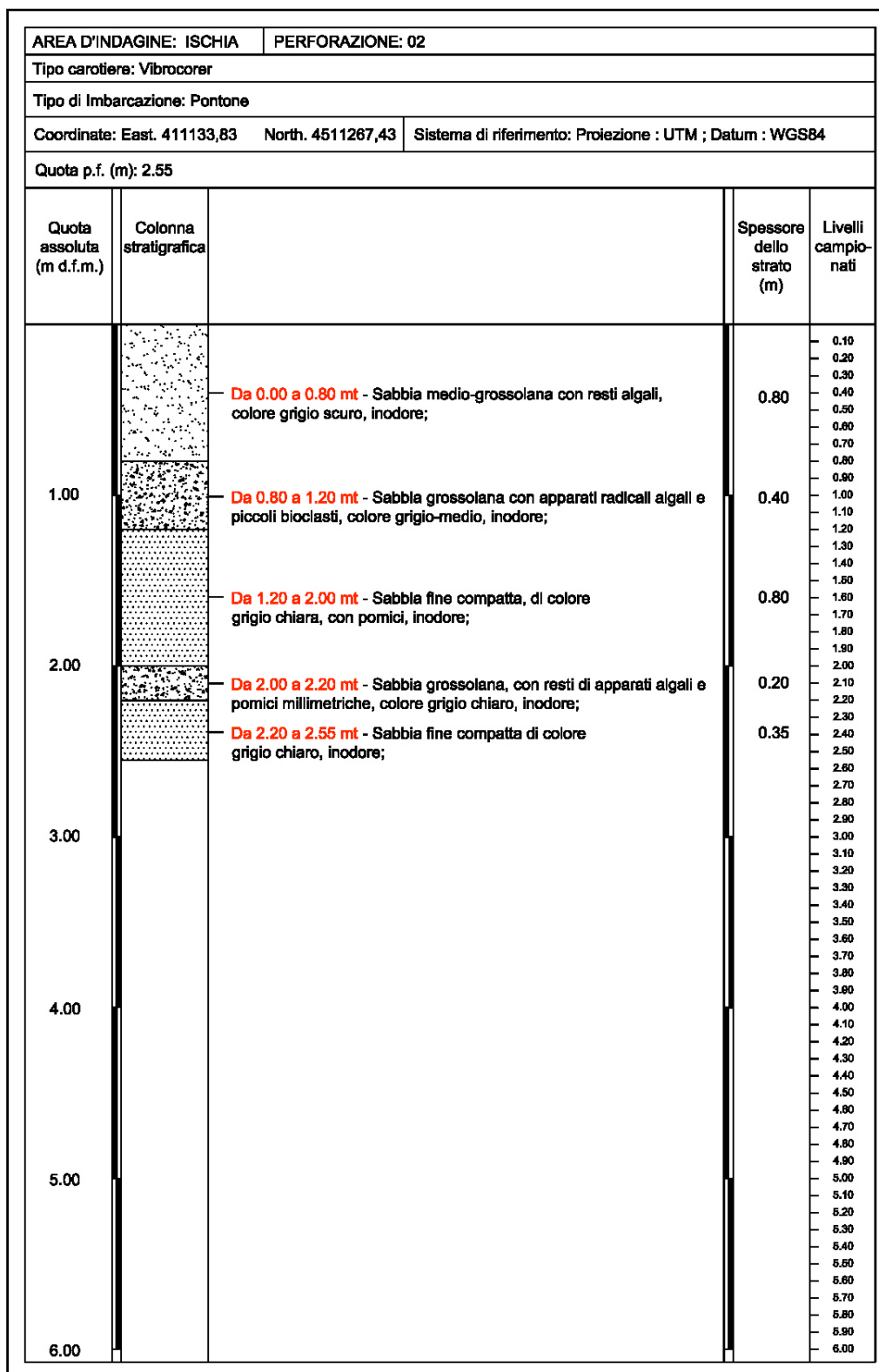
I sondaggi sono stati eseguiti utilizzando il vibrocarotiere *Vibracore* di proprietà dell'IAMC-CNR di Napoli, messo a punto dallo stesso Istituto in collaborazione con la *Georesource* Ltd. (Rotterdam, Olanda).

Vengono, a titolo di esempio, riportate le colonne stratigrafiche di due carotaggi, localizzati rispettivamente nell'area di Ischia Porto (Fig. 24) e nell'area di Torregaveta (Fig. 25).

Il carotaggio "*Ischia 02*" ha campionato litologie prevalentemente sabbiose. In particolare, dal fondo mare fino a 0.80 m sono state attraversate sabbie medio-grossolane con resti algali, di colore grigio-scuro; da 0.80 m a 1.20 m sono state rinvenute sabbie grossolane con apparati radicali algali e piccolo bioclasti, di colore grigio-medio. Procedendo verso il basso e fino a 2.00 m di profondità sono state rinvenute sabbie fini compatte, di colore grigio-chiaro, caratterizzate dalla presenza di pomici, al di sotto delle quali è stato rinvenuto un livello spesso 0.20 m di sabbie grossolane, con resti di apparati algali e pomici millimetriche. Infine, da 2.20 m a 2.55 m sono state rinvenute sabbie fini compatte di colore grigio chiaro (si veda la figura corrispondente).

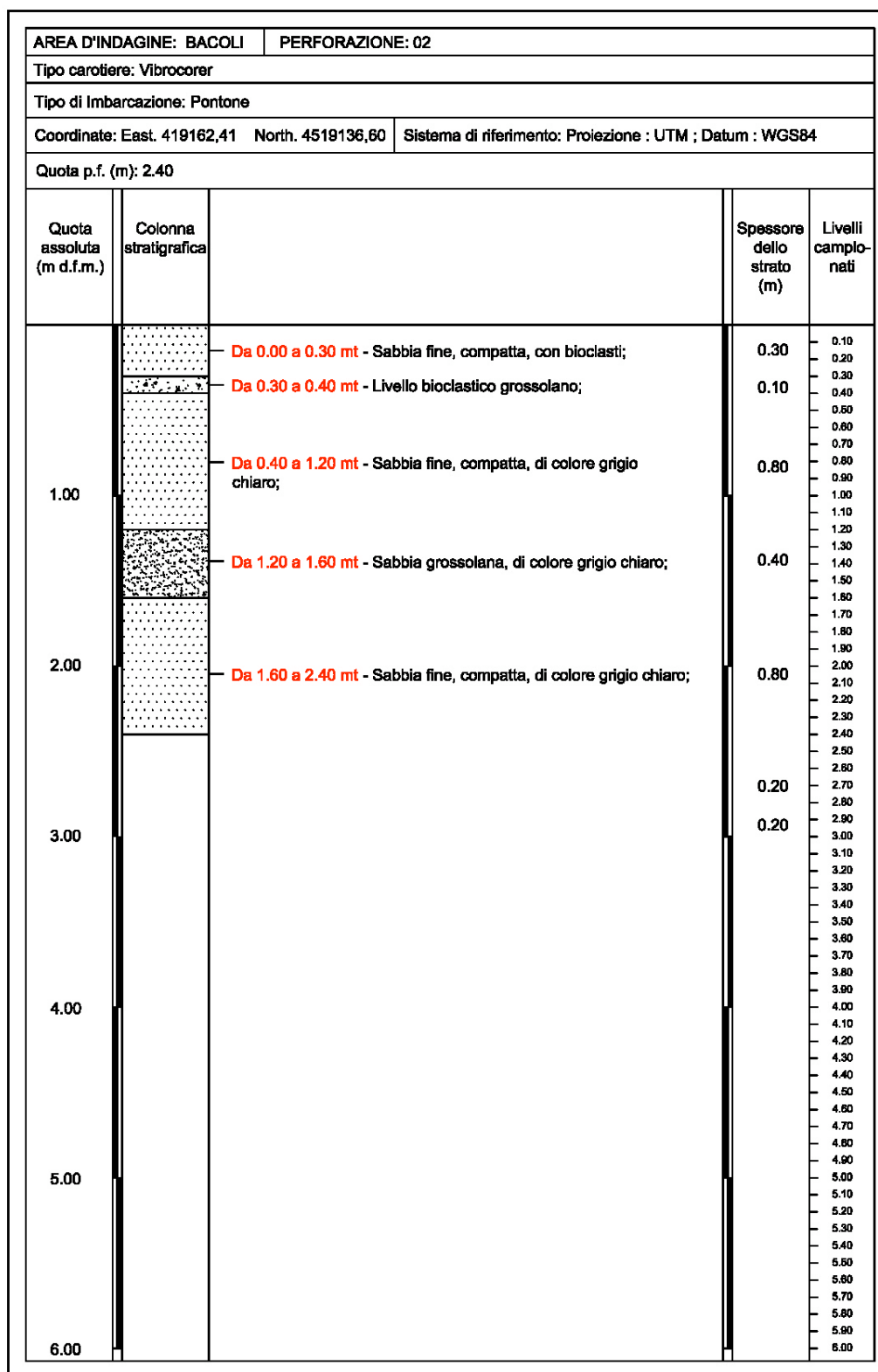
Il carotaggio "*Bacoli 2*" ha rinvenuto litologie sabbiose più fini rispetto a quelle rinvenute ad Ischia. In particolare, sono state rinvenute sabbie fini compatte, con bioclasti, di spessore di circa 0.30 m, al di sotto del quale è stato rinvenuto un livello bioclastico grossolano, che presenta uno spessore di 0.10 m. Procedendo verso il basso, da 0.40 m a 1.20 m sono state rinvenute sabbie fini compatte, di colore grigio-chiaro, di colore grigio-chiaro. Da 1.20 a 1.60 m sono state rinvenute sabbie grossolane, di colore grigio-chiaro, sovrapposte a sabbie fini compatte, di colore grigio chiaro, che presentano uno spessore di 0.80 m. Le carote sono state campionate ogni 10 centimetri.

La classe granulometrica che domina nei campioni prelevati, sia nella zona campionata nell'area di Torregaveta che nell'area di Ischia Porto risulta essere quella sabbiosa, con valori percentuali variabili tra 80% e 100%. In particolare, i campioni provenienti dall'area di Torregaveta mostrano una maggiore componente fine (limo-argilla) con valori mediani circa 11% superiori a quelli relativi all'area di Ischia ed ovviamente una relativa e proporzionale minore quantità di sabbia.



**Figura 24.** Colonna stratigrafica del carotaggio Ischia 02, perforato nell'area di Ischia Porto (si veda la fig. 21 per l'ubicazione). Si noti la prevalenza di granulometrie ricadenti nel campo delle sabbie grossolane bioclastiche, alternati ad intervalli di sabbie fini.





**Figura 25.** Colonna stratigrafica del carotaggio Bacoli 02, perforato nell'area di Torregaveta (si veda la fig. 23 per l'ubicazione). Si noti la prevalenza di granulometrie ricadenti nel campo delle sabbie fini, con intercalazioni di livelli bioclastici grossolani e di sabbie grossolane di colore grigio.

## Bibliografia

- Acocella, V., Salvini, F., Funicello, R., Faccenna, C., (1999). The role of transfer structures on volcanic activity at Campi Flegrei (Southern Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 91, 123-139.
- Aiello, G., Angelino, A., Marsella, E., Ruggieri, S., Siniscalchi, A., (2005). High resolution magnetic anomaly map of the continental shelf between the Gulf of Gaeta and the Island of Ischia (Southern Tyrrhenian sea, Italy). *Extended Abstract Convegno FIST Geitalia, 2005*, Rimini, Poster.
- Aiello, G., Marsella, E., Sacchi, M., (2000). Quaternary structural evolution of Terracina and Gaeta basins (Eastern Tyrrhenian margin, Italy). *Rend. Fis. Acc. Lincei*, 11, 41-58.
- Arciniega-Ceballos, A., Hernandez-Quintero, E., Cabral-Cano, E., Morett-Alatorre, L., Diaz-Molina, O., Soler-Arechalde, A., Chavez-Segura, R., (2009). Shallow geophysical survey at the archaeological site of San Miguel Tocuila, Basin of Mexico. *Journal of Archaeological Science*, 36, 1199-1205.
- Bartole, R., Savelli, D., Tramontana, M., Wezel, F.C., (1984). Structural and sedimentary features in the tyrrhenian margin off Campania, southern Italy. *Marine Geology*, 55, 163-180.
- Boyce, J.I., Reinhardt, E.G., Goodman, B.N., (2009). Magnetic detection of ship ballast deposits and anchorage sites in King Herod's Roman harbour, Caesarea Maritima, Israel. *Journal of Archaeological Science*, 36, 1516-1526.
- Bruno, P.P.G., Di Fiore, V., Ventura, G., (2000). Seismic study of the 41st parallel Fault System offshore the Campanian-Latinal continental margin, Italy. *Tectonophysics*, 324, 37-55.
- Buyuksarac, A., Bilim, F., Ates, A., Bektas, O., (2006). Investigation of magnetic surveying data of buried grave jars in Harmanoren Necropolis (Turkey) using linear transformations and analytic signal. *Journal of Archaeological Science*, 33, 910-920.
- Chavez, R.E., Camara, M.E., Tejero, A., Barba, L., Manzanilla, L., (2001). Site Characterization by Geophysical Methods in The Archaeological Zone of Teotihuacan, Mexico. *Journal of Archaeological Science*, 28, 1265-1276.
- Cooper, G.R.J., (2006). Interpreting potential field data using continuous wavelet transforms of their horizontal derivatives. *Computers & Geosciences*, 32, 984-992.
- Corrado, G. e Rapolla, A., (1981). The gravity field of Italy: analysis of its spectral composition and delineation of a tridimensional crustal model for central-southern Italy. *Bollettino di Geofisica Teorica Applicata*, 23, 17-29.
- de Alteriis, G., Fedi, M., Passaro, S., Siniscalchi, A., (2006). Magneto-seismic interpretation of subsurface volcanism in the Gaeta Gulf (Italy, Tyrrhenian sea). *Annals of Geophysics*, 49 (4/5), 929-943.
- De Vita, S., Orsi, G., Civetta, L., Carendente, A., D'Antonio, M., Deino, A., Di Cesare, T., Di Vito, M.A., Fisher, R.V., Isaia, R., Marotta, E., Necco, A., Ort, M., Pappalardo, L., Piochi, M., Southon, J., (1999). The Agnano-Monte Spina eruption (4100 years BP) in the restless Campi Flegrei caldera (Italy). *Journal of Volcanol. Geothermal Research*, 91, 269-301.
- Di Fiore, B., Chianese, D., (2008). Electric and magnetic tomographic approach for the geophysical investigation of an unexplored area in the archaeological site of Pompeii (Southern Italy). *Journal of Archaeological Science*, 35, 14-25.
- Di Vito, M.A., Isaia, R., Orsi, G., Southon, J., De Vita, S., D'Antonio, M., Pappalardo, L., Piochi, M., (1999). Volcanism and deformation since 12.000 years at the Campi Flegrei caldera (Italy). *Journal of Volcanol. Geothermal Research*, 91, 221-246.
- Drahor, M.G., Kurtulmus, T.O., Berge, M.A., Hartmann, M., Speidel, M.A., (2008). Magnetic imaging and electrical resistivity tomography studies in a Roman military installation found in Satala archaeological site, northeastern Anatolia, Turkey. *Journal of Archaeological Science*, 35, 259-271.
- El-Sadek, M.A., (2009). Radiospectrometric and magnetic signatures of a gold mine in Egypt. *Journal of Applied Geophysics*, 67, 34-43.
- Fais, S., Klingele, E.E., Lecca, L., (1996). Oligo-Miocene half graben structure in Western Sardinian Shelf (western Mediterranean): reflection seismic and aeromagnetic data comparison. *Marine Geology*, 133, 203-222.
- Fedi, M. e Rapolla, A., (1990). I metodi gravimetrico e magnetico nella geofisica della Terra solida. Liguori Editore
- Hsu, S., Sibuet, J.C., Shyu, C., (1996). High resolution detection of geological boundaries from potential field anomalies: an enhanced Analytic Signal technique. *Geophysics*, 61 (2/1), 373-386.

- Jeng, Y., Lee, Y.L., Chen, C.Y., Lin, M.J., (2003). Integrated signal enhancements in magnetic investigation in archaeology. *Journal of Applied Geophysics*, 53, 31-48.
- Mandea, M. and Macmillan, S., (2000). International Geomagnetic Reference Field - the eighth generation. *Earth Planets Space*, 52, 1119-1124.
- Mariani, M., Prato, R., (1988). I bacini neogenici costieri del margine tirrenico: approccio sismico stratigrafico. *Memorie della Società Geologica Italiana*, 41, 519-531.
- Missiaen, T., Feller, P., (2008). Very-high-resolution seismic and magnetic investigations of a chemical munition dumpsite in the Baltic Sea. *Journal of Applied Geophysics*, 65, 142-154.
- Nunziata, C. e Rapolla, A., (1987). A gravity and magnetic study of the volcanic island of Ischia, Naples (Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 31, 333-344.
- Orsi, G., Civetta, L., Del Gaudio, C., De Vita, S., Di Vito, M.A., Isaia, R., Petrazzuoli, S.M., Ricciardi, G.P., Ricco, C., (1999). Short-term ground deformations and seismicity in the resurgent Campi Flegrei caldera (Italy): an example of active block-resurgence in a densely populated area. *Journal of Volcanology Geothermal Research*, 91, 415-451.
- Ozgu Arisoy, M., Kocak, O., Buyuksarac, A., Bilim, F., (2007). Images of buried graves in Bayat, Afyon (Turkey) from high-resolution magnetic data and their comparison with preliminary excavations. *Journal of Archaeological Science*, 34, 1473-1484.
- Paoletti, V., Di Maio, R., Cella, F., Florio, G., Motschka, K., Roberti, N., Secomandi, A., Supper, R., Fedi, M., Rapolla, A., (2009). The Ischia volcanic island (Southern Italy): Inferences from potential data interpretation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 179, 69-86.
- Penta, F., (1961). Schema idrotermologico dell'isola d'Ischia. Associazione internazionale degli idrogeologi, Roma.
- Phillips, J.D., Duval, J.S., and Ambrosiak, R.A., (1993). National geophysical data grids: gamma-ray, gravity, magnetic, and topographic data for the conterminous United States. U.S. Geological Survey Digital Data Series DDS-9, 1 CD-ROM. (includes potential-field software version 2.1).
- Pilkington, M., (2007). Locating geologic contacts with magnitude transforms of magnetic data. *Journal of Applied Geophysics*, 63, 80-89.
- Quinn, R., Breen, C., Forsythe, W., Barton, K., Rooney, S., O'Hara, D., (2002). Integrated Geophysical Surveys of The French Frigate La Surveillante (1797), Bantry Bay, Co. Cork, Ireland. *Journal of Archaeological Science*, 29, 413-422.
- Roest, W.R., Verhoef, J., Pilkinton, M., (1992). Magnetic interpretation using the 3D Analytic Signal. *Geophysics*, 57 (1), 116-125.
- Rosi, M., Sbrana, A., (1987). Phlegrean Fields. Monografie del CNR, Quaderni de La Ricerca Scientifica, Roma, Italy.
- Salem, A., Ravat, D., Gamey, T.J., Ushijima, K., (2002). Analytic signal approach and its applicability in environmental magnetic investigations. *Journal of Applied Geophysics*, 49, 231-244.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., (1991). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press.



**Coordinamento editoriale e impaginazione**

Centro Editoriale Nazionale | INGV

**Progetto grafico e redazionale**

Laboratorio Grafica e Immagini | INGV Roma

© 2009 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

**<http://www.ingv.it>**



**Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia**