

Relazione Scientifica

Angela Perrone

Istituto di Metodologie per l'Analisi Ambientale (IMAA)

Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)

Titolo del programma:

Analisi ed interpretazione di dati elettromagnetici nel dominio del tempo (TEM) acquisiti in aree a geologia complessa

Dipartimento di afferenza:

Scienze del sistema terra e tecnologie per l'ambiente

Istituto ospitante:

Technological Educational Institute of Crete – Department of Natural Resources & Environment – Laboratory of Geophysics & Seismology, Chania (Crete, Greece).

Durata:

21 giorni, 06/05/2013 – 27/05/2013



I. Introduzione	3
II. Area di studio	4
III. La Metodologia	5
IV. Campagne di misura	9
V. I risultati	11
VI. Conclusioni e sviluppi futuri	25
VII. Ringraziamenti	26
VIII. Bibliografia	26

Introduzione

Lo studio di aree a geologia complessa richiede necessariamente un approccio di tipo multidisciplinare basato sull'applicazione integrata di molteplici tecniche di indagine. Le aree simicamente attive rappresentano un esempio di aree a geologia complessa nonché un laboratorio naturale nel quale sperimentare diverse tecniche di indagine, al fine di valutarne l'applicabilità e di acquisire il maggior numero di informazioni possibili nonché utili per procedere ad una migliore caratterizzazione della stessa area. Per poter contribuire alla definizione del potenziale sismico di aree simicamente attive si possono applicare metodologie di analisi geologiche, geofisiche e statistiche. Le prime consentono di comprendere l'evoluzione geologica dell'area oggetto di studio con particolare riguardo al riconoscimento ed alla valutazione delle evidenze tettoniche attive. Le tecniche geofisiche possono contribuire a migliorare le conoscenze sull'assetto geologico-strutturale dell'area oggetto di studio e a definire con maggiore precisione le componenti relative al campo di stress. Le tecniche statistiche, infine, consentono di studiare la distribuzione spazio-temporale dei terremoti permettendo il riconoscimento di eventuali pattern di distribuzione spaziali e temporali.

Negli ultimi anni, tra le tecniche di prospezione geofisica per l'investigazione e il monitoraggio di aree ad elevato rischio sismico, le tecniche geoelettriche ed elettromagnetiche (Potenziale Spontaneo, Tomografia di Resistività Elettrica ad alta risoluzione superficiale e profonda, metodo EM, GPR o Georadar, metodo Magnetotellurico) hanno assunto un ruolo sempre più importante. Tali tecniche non-invasive hanno il pregio di associare un basso costo di esplorazione ed un'elevata risoluzione nella individuazione di strutture sepolte e nella loro caratterizzazione geometrica. Se eseguite attraverso le principali strutture tettoniche possono contribuire alla risoluzione di alcune problematiche di carattere geologico, quali l'assetto sismotettonico dell'area di studio, l'esatta ubicazione e caratterizzazione geometrica superficiale e profonda delle faglie attive, la valutazione della corretta ubicazione di trincee per successivi studi paleosismologici, la caratterizzazione litologico-stratigrafica del sottosuolo finalizzata alla valutazione degli effetti di amplificazione di sito nell'ambito di studi sulla Microzonazione Sismica, ecc.

L'attività svolta durante il programma di mobilità è consistita nell'applicazione e sperimentazione di due metodi geofisici, il metodo elettromagnetico nel dominio del tempo (TEM) e il metodo magnetotellurico (MT), per contribuire alla ricostruzione della struttura geoelettrica di una porzione della zona di subduzione dell'arco Ellenico dell'Egeo Meridionale in Grecia. L'attività

svolta rientra in un progetto della durata triennale, condotto dai ricercatori e tecnici del TEI e che vede coinvolti anche altri istituti di ricerca europei, con lo scopo di definire la struttura geoelettrica dell'intero arco ellenico, di individuare eventuali anomalie temporali in tale struttura geoelettrica mediante l'installazione di stazioni MT permanenti e di studiarne l'eventuale correlazione con l'attività sismica presente nell'area al verificarsi di tali anomalie.

I. Area di studio

Le isole di Creta, Kithira, Kassos, Karpathos e Rodi, costituiscono la struttura geologica nota come Arco Ellenico (Angelier, 1976) che si estende dal Peloponneso, a nord-ovest, fino all'isola di Creta, a sud. L'arco Ellenico, al pari del Mar Egeo, delle coste greche circostanti e della Turchia occidentale, rappresenta una delle regioni sismicamente più attive dell'Eurasia occidentale essendo l'espressione della zona di subduzione della litosfera oceanica africana sotto la placca eurasiatica (Fig.1) (Vallianatos & Makris, 2000).

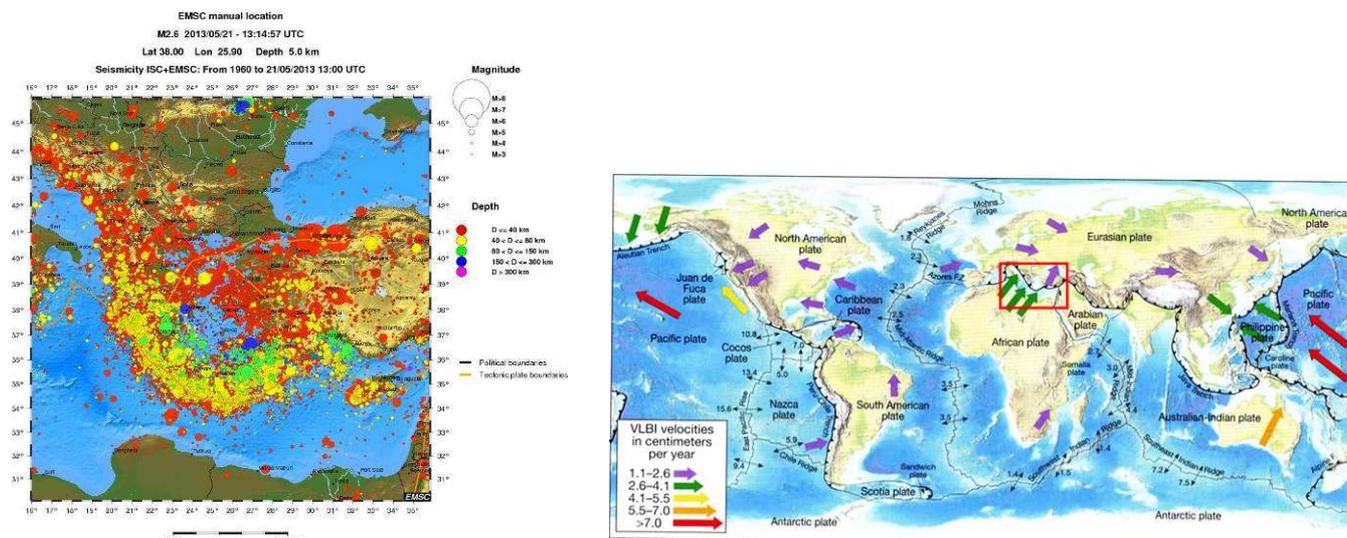


Figura 1 – A sinistra è riportata la mappa della sismicità presente nel Mar Egeo (<http://www.emsc-csem.org>); a destra la mappa delle velocità di spostamento delle placche (www.unibz.it).

Tale zona, caratterizzata da una sismicità con profondità intermedia, indice di un angolo di subduzione basso, separa il Mediterraneo meridionale, profondo circa 3 km e indeformato, dal Mar Egeo, che ha una struttura notevolmente complessa. Al centro dell'Egeo troviamo una serie di apparati vulcanici (Milos, Antimilos, Antiparos, Santorini, Kos, Yali, Nisiros, ecc.), pseudoparalleli al trench, che ne rappresentano l'arco interno (Le Pichon e Angelier 1979; Taymaz et al., 1991).

L'isola di Creta e le isole dell'Egeo offrono un ottimo accesso on-shore per la struttura interna della parte anteriore dell'arco a vari livelli (Seidel, 2003). Tale area è molto interessante sia per la sua

impostazione geologico-strutturale che, naturalmente, per la sua sismicità storica (Pirazzoli et al., 1996; Stiros, 2001) e recente (Nikolintaga et al, 2008). Pertanto, a parte i consueti studi di sismotettonica, è considerata una zona eccellente per tentare di associare variazioni di campo elettrico (Huang & Liu, 2006), campo magnetico e/o cambiamenti nella struttura geoelettrica del sottosuolo (Nagao et al., 2002) con l'attività sismica. La letteratura è piena di segnalazioni di fenomeni pre-sismici, soprattutto di natura elettrico, magnetico o elettromagnetico. Recensioni complete su tale argomento si possono trovare in Tzanis & Vallianatos (2002), mentre molte informazioni aggiuntive sono riportate nelle collezioni a cura di Hayakawa & Fujinawa (1994).

II. Le Metodologie

Per lo svolgimento dell'attività di ricerca sono state utilizzate due tecniche geofisiche: la magnetotellurica (MT) per lo studio delle strutture più profonde e il metodo elettromagnetico transiente (TEM) per le indagini più superficiali. I due metodi, lavorando a risoluzioni spaziali differenti e investigando diverse profondità del sottosuolo (la magnetotellurica consente di raggiungere una profondità di investigazione maggiore perdendo di risoluzione negli strati più superficiali, il metodo TEM ha una maggiore risoluzione superficiale e raggiunge minore profondità di investigazione), quando utilizzati insieme possono considerarsi complementari e consentono di migliorare la risoluzione spaziale dell'informazione.

Metodo magnetotellurico (MT)

La magnetotellurica, nata negli anni 50 (Tikhonov, 1950; Cagniard, 1953), è un metodo geofisico passivo a "sorgente naturale" finalizzato alla determinazione della struttura della conducibilità elettrica del sottosuolo. La sorgente naturale utilizzata da tale metodo è rappresentata dal campo elettromagnetico naturale anche noto come campo primario. Quando tale campo raggiunge la superficie terrestre, una parte di esso viene riflessa dalla superficie, mentre la restante parte penetra nel sottosuolo propagandosi in profondità. La porzione di campo primario che penetra all'interno della terra genera correnti elettriche indotte, denominate correnti telluriche, alle quali è associato un campo magnetico secondario. La magnetotellurica si basa proprio sulla misura in superficie delle variazioni temporali del campo elettromagnetico totale, dato dalla somma del campo primario e di quello secondario. Tali misure consentono di ricavare informazioni sulle proprietà elettriche del sottosuolo poiché il rapporto tra le intensità delle componenti orizzontali dei campi elettrici e magnetici misurate in superficie fornisce una grandezza fisica che ha le

dimensioni di una impedenza elettrica, il cui andamento è legato alla distribuzione della resistività del mezzo attraversato.

Considerato l'elevato contenuto in frequenza dei campi elettromagnetici utilizzati da tale metodo, i valori di resistività medi caratteristici delle rocce del mantello superiore e della crosta, e soprattutto che la profondità di penetrazione delle onde elettromagnetiche nel sottosuolo è funzione della loro frequenza e dei valori di conducibilità delle rocce attraversate, le profondità di investigazione raggiungibili applicando il metodo MT sono comprese in un range che va da pochi metri fino a qualche centinaio di chilometri.

L'interpretazione dei dati MT consente di ottenere modelli 1D dell'assetto geoelettrico del sottosuolo e di procedere, successivamente, alla modellizzazione 2D e 3D dello stesso.

Nell'ambito del progetto l'acquisizione dei dati MT è stata effettuata utilizzando due sistemi MT-24/LF della EMI Inc. (24-bit A/D Low-frequency systems). La strumentazione di base (Fig.2) consiste di un sistema di rilevazione del segnale (sensori magnetici ed elettrici) e di uno strumento per la registrazione dei dati (MT24/LF system Operation & Maintenance Manual, 2003). I dati acquisiti sono stati analizzati ed interpretati utilizzando il software WinGLink (WinGLink manual, 2005).



Figura 2 - Strumentazione MT: a) MT-24/LF (24-bit A/D Low-frequency systems); b) sensore magnetico; c) sensore elettrico.

Metodo elettromagnetico nel dominio del tempo (TEM)

Il metodo elettromagnetico nel dominio del tempo è un metodo geofisico attivo che consente di misurare la resistività elettrica del terreno mediante l'induzione di correnti parassite nei conduttori del sottosuolo per mezzo di energia elettromagnetica a impulsi trasmessa da una spira posta sulla superficie del terreno (McNeill, 1980; Nabighian & Macnae, 1991). Il decadimento delle correnti indotte provoca un campo magnetico secondario decrescente che viene misurato, mediante la spira di trasmissione o altra spira posta al centro o al lato di essa, immediatamente dopo la fine dell'impulso primario, a vari intervalli di tempo (fino a 30).

Il principio di funzionamento del metodo è basato sul fatto che, quando un flusso di corrente viene interrotto, esso non decade istantaneamente a zero, provocando la variazione del campo magnetico primario. Questa variazione induce istantaneamente nel sottosuolo in prossimità del cavo trasmittente, anelli di correnti parassite che si diffondono nel sottosuolo verso il basso e verso l'esterno, in accordo alla legge di Neuman – Faraday. Queste correnti producono, a loro volta, un campo magnetico secondario che si oppone alla variazione del campo magnetico primario.

Con il passare del tempo, la diffusione laterale ed in profondità degli anelli di corrente indotta provoca la diminuzione del campo magnetico secondario, la cui variazione induce una f.e.m. nella spira ricevente localizzata in superficie. La variazione delle intensità delle correnti parassite e, quindi, il decadimento del campo magnetico secondario sono influenzati dalla resistività dei terreni e perciò la misura di questa variazione in funzione del tempo ci darà informazioni sulla misura della resistività in funzione della profondità.

La profondità di investigazione di un sondaggio TEM, compresa in un range che varia da pochi metri a qualche centinaio di metri, dipende dal momento di dipolo del trasmettitore e dalla conduttività degli strati sotterranei. Un momento maggiore (che si ottiene aumentando la grandezza della maglia e/o la corrente del trasmettitore) e un aumento nella resistività del terreno daranno una penetrazione superiore. I sondaggi EM nel dominio del tempo vengono in genere rappresentati sotto forma di grafici congiunti che rappresentano la resistività apparente calcolata in funzione del tempo e la resistività interpretata in funzione della profondità. Invertendo i dati riportati in tali grafici è possibile ottenere modelli geoelettrici 1D del sottosuolo.

Nell'ambito del progetto le misure TEM sono state effettuate usando il sistema TEM-Fast 48 system della AEMR Ltd (TEM-Fast 48 manual, 2007) collegato ad un sistema di batterie in serie, ad un palmtop e ad una spira della lunghezza di 200 m (Fig.3). Per il processing e l'analisi dei dati si è utilizzato il software TEM-RESearcher che consente di leggere i dati sperimentali, effettuare il

processing e restituire i risultati sotto forma di sezioni del gradiente o di modelli 1D della distribuzione degli strati elettrici nel sottosuolo (TEM-RES manual, 2007).



Figura 3 - Strumentazione TEM: a) palmtop PC; b) batteria esterna (12V+12V in serie=24V); c) TEM Fast 48 sysetm.

III. Campagne di misura

Nell'ambito del programma di mobilità sono stati acquisiti dati di magnetotellurica (MT) e dati elettromagnetici nel dominio del tempo (TEM) in diverse isole ubicate nell'area sud-orientale del mare EGEO con lo scopo di risalire alla caratterizzazione geoelettrica del sottosuolo.

Il raggiungimento di tale obiettivo ha richiesto lo svolgimento di una campagna di misure della durata di circa 21 giorni in 5 isole di tale area e precisamente: Rodi, Tilos, Nisyros, Kos e Astipalaia (Fig.4).



Figura 4 - Mappa di Google earth con indicazione delle isole in cui sono state effettuate le campagne di misura.

Le misure sono state effettuate utilizzando due stazioni magnetotelluriche, una di proprietà del CNR-IMAA e l'altra del TEI, e uno strumento per l'acquisizione dei dati TEM di proprietà del TEI.

Per ciascuna isola sono state individuate due aree, prima utilizzando foto aeree ricavate da Google Earth e poi effettuando rilievi in loco, nelle quali effettuare sia il sondaggio magnetotellurico che quello TEM. In ciascun sito di indagine l'installazione dei sensori magnetici ed elettrici per le misure MT ha richiesto delle operazioni di scavo effettuate sia con sistemi manuali che con sistemi semi-motorizzati. Il tempo di installazione è variato da una a due ore circa in funzione della natura dei terreni incontrati.

La campagna di indagine, totalmente organizzata dai colleghi del TEI, ha avuto inizio il 6 maggio 2013; la prima isola investigata è stata RODI. Le stazioni magnetotelluriche sono state installate la mattina del 7 maggio per essere rimosse nella tarda mattinata del 10 maggio (Fig.5). Le misure TEM

sono state invece effettuate tutte nel giorno 7 prima che avesse inizio l'acquisizione magnetotellurica per evitare che l'invio di corrente nel sottosuolo potesse inficiarne le misure.



Figura 5 - Operazioni necessarie per l'installazione dei sensori MT.

Dopo un'introduzione alle procedure di campagna necessarie per effettuare le misure TEM, da parte dei colleghi del TEI, si è proceduto al posizionamento della spira e alla realizzazione delle misure (Fig.6). La spira utilizzata come sensore sorgente e ricevitore aveva una lunghezza di 200 m consentendo di raggiungere una profondità di investigazione di circa 180 m.



Figura 6 - Operazioni necessarie per l'effettuazione delle misure TEM.

La seconda isola investigata è stata quella di Tilos, le stazioni di misura magnetotellurica sono rimaste in acquisizione dall'11 al 13 maggio. Le misure TEM sono state effettuate nell'arco della prima giornata. Il giorno 12 è stato dedicato al downloading dei dati acquisiti a Rodi e ad una prima elaborazione, seppure qualitativa.

Dal 14 al 17 maggio si è proceduto alla realizzazione delle misure nell'isola di Nisyros. Si tratta di un'isola vulcanica nella cui caldera è possibile individuare diverse fumarole e la venuta a giorno di acqua ad alta temperatura. In tale isola, oltre al classico approccio della realizzazione in due diversi siti di misure MT e TEM, si è effettuato anche un profilo TEM contenente 15 sondaggi. Il profilo è stato realizzato all'interno della caldera utilizzando come punti di inizio e fine le due stazioni di misura congiunta MT-TEM e attraversando il cratere di Stefanos. Lo scopo è stato quello di verificare l'andamento della struttura geologica più superficiale caratterizzante l'interno della caldera.

Le ultime due campagne di misura hanno riguardato le isole di Kos (dal 18/05/2013 al 20/05/2013) ed Astipalaia (dal 21/05/2013 al 24/05/2013) dove si è seguita la stessa procedura di acquisizione utilizzata nelle altre isole.

Generalmente il pre-processing dei dati TEM acquisiti in un'isola è stato effettuato nell'isola successiva.

IV. I risultati

I risultati ottenuti nell'ambito di questo progetto sono da ritenersi non ancora definitivi, soprattutto quelli relativi alle misure MT, poiché la loro interpretazione richiede l'acquisizione di ulteriori dati in aree appartenenti all'arco Ellenico e non ancora investigate. Per quanto concerne i dati TEM è stato possibile effettuare un primo processing al fine di ottenere modelli 1D di resistività elettrica utili a definire, in maniera preliminare, l'assetto elettrostratigrafico dei primi 150 metri di sottosuolo. Dove possibile, soprattutto in funzione del reperimento di dati presenti in bibliografia, i modelli TEM sono stati interpretati anche mediante il confronto con dati di natura geologica.

Nella figura 7 è possibile visualizzare il posizionamento delle stazioni di misura MT e TEM nell'isola di Rodi. Nonostante nella fase iniziale si fosse cercato di ubicare le stazioni in zone abbastanza lontane l'una dall'altra, in fase di acquisizione per problemi logistici in alcune aree è stato necessario ricollocarle. Ciò soprattutto per le misure MT in quanto l'area di indagine doveva essere assolutamente priva di rumore antropico quindi lontana dai centri abitati e da tutto quello che poteva produrre correnti telluriche aggiuntive.

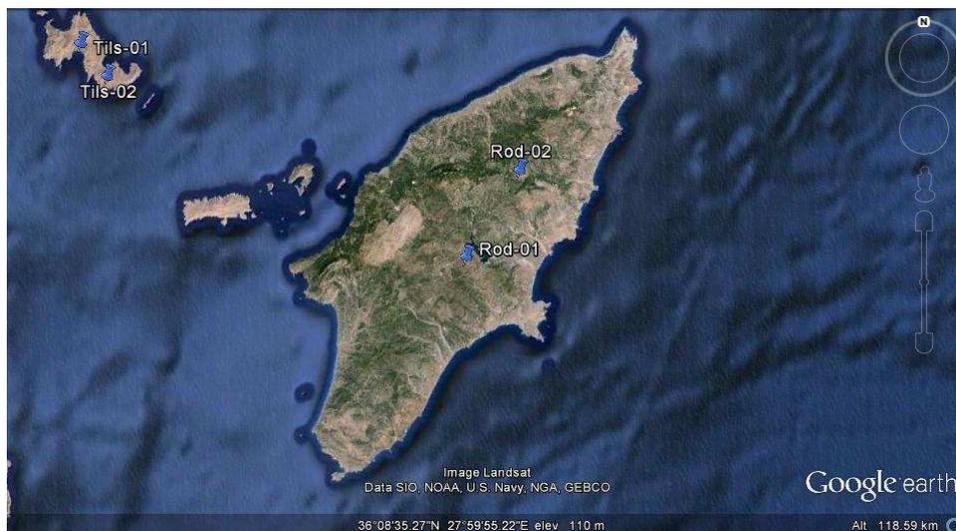


Figura 7 - Mappa dell'isola di Rodi da Google earth con ubicazione delle due stazioni di misura in cui sono state effettuate misure congiunte di MT e TEM.

La figura 8 riporta le due curve TEM ottenute nell'isola di Rodi e precisamente nella stazione ROD-01 (a sinistra) e ROD-02 (a destra). Tali curve si riferiscono alla distribuzione della resistività in funzione del tempo. Il grafico oltre a riportare la curva relativa ai dati acquisiti in campagna (curva spezzata), mostra anche la curva calcolata (quella intera che fitta bene la curva sperimentale) e la curva di smoothing.

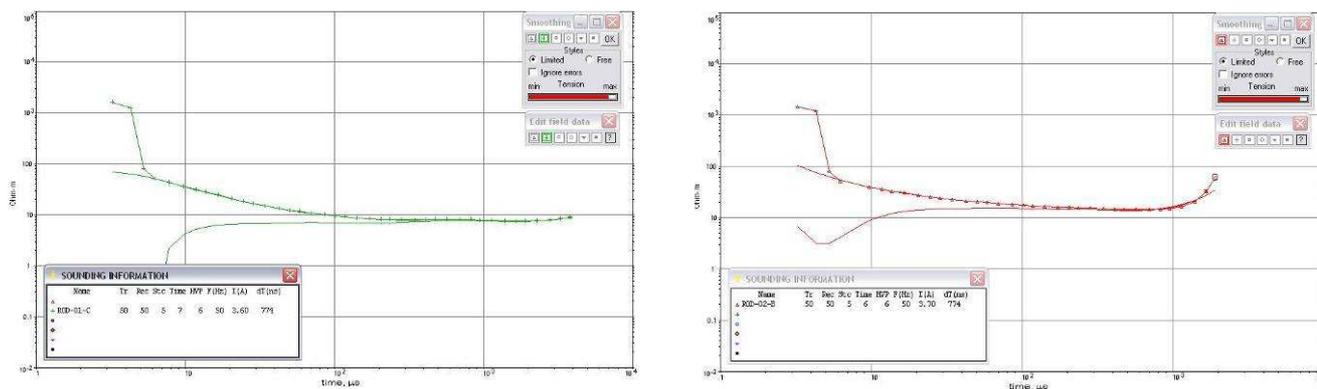


Figura 8 - Curve di resistività elettrica ottenute con il metodo TEM nelle stazioni Rod-01 (sinistra) e Rod-02 (destra).

Posizionando le stazioni di misura sulla mappa geologica si osserva che ricadono in aree a diversa litologia: la stazione Rod-01 è stata ubicata nei terreni appartenenti alla formazione del Flysch di

Katavia (Veen and Kleinspehn, 2002), mentre la Rod-02 nei terreni dei bacini formatisi in età Neogene-Quaternario (Fig.9).

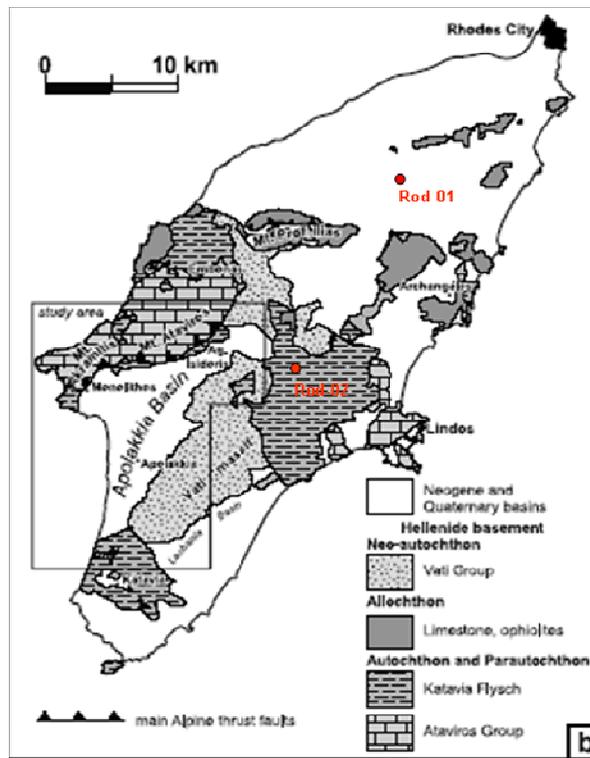


Figura 9 - Mappa geologica di Rodi che riporta l'ubicazione delle stazioni di misura MT e TEM (immagine modificata da ten Veen e Kleinspehn, 2002).

Osservando i due modelli 1D (Fig.10) si nota che entrambi mostrano un sottosuolo a due elettrostrati; in particolare il modello Rod-01 (a sinistra) è caratterizzato da materiale più conduttivo ($\rho < 10 \Omega\text{m}$) per i primi 120 m circa, profondità alla quale si rinviene un brusco salto di resistività ($\rho \sim 10^3 \Omega\text{m}$) ad indicare il passaggio da materiale meno competente a materiale relativamente più compatto probabilmente di natura calcarea. Il modello ottenuto nella stazione Rod-02 (a destra) è caratterizzato per i primi 70 m circa da materiale più conduttivo ($\rho \sim 10 \Omega\text{m}$) e, in profondità, da materiale più resistivo ($\rho > 10^3 \Omega\text{m}$) con valori riferibili a quelli riscontrati nella porzione profonda del modello Rod-01. Si può quindi concludere che nella zona nord-est dell'isola il substrato più competente, costituito da materiale calcareo, è posizionato ad una profondità minore rispetto al p.c.

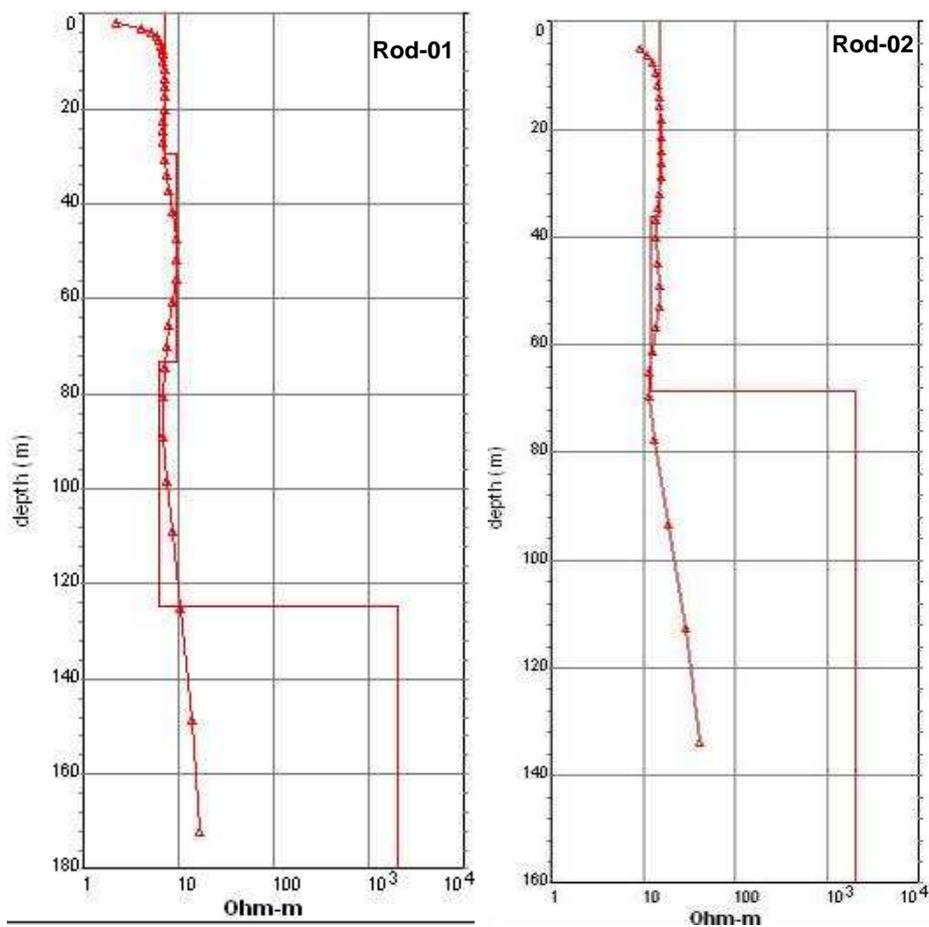


Figura 10 - Modelli di resistività 1D ottenuti dal processing dei dati TEM acquisiti nelle stazioni Rod-01 (sinistra) e Rod-02 (destra).

La figura 11 riporta la mappa dell'isola di Tilos, ricavata da Google earth, con l'ubicazione delle due stazioni di misura.

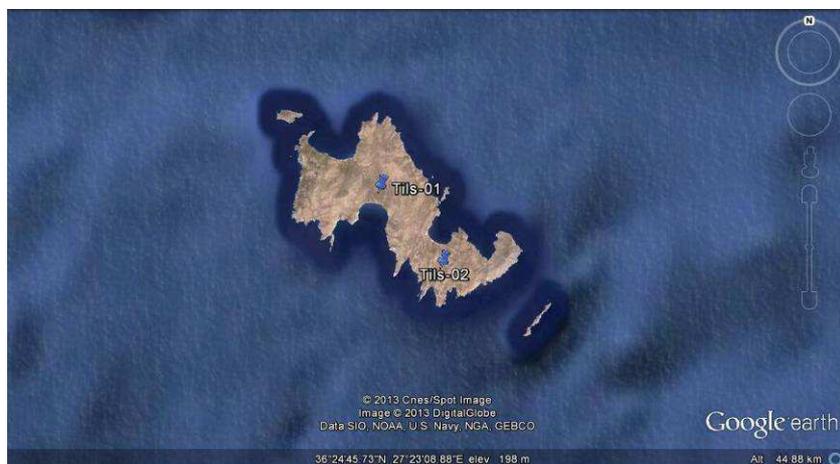


Figura 11 - Ubicazione delle stazioni di misura TEM ed MT nell'isola di Tilos.

In figura 12 è possibile osservare le curve di resistività elettrica in funzione del tempo ottenute rispettivamente nel sito di misura Tils-01 (a sinistra) e Tils-02 (a destra).

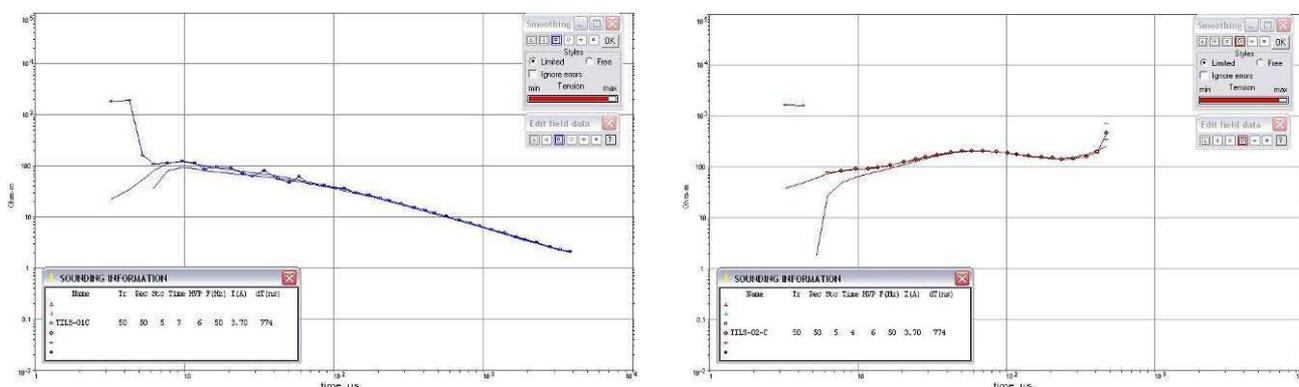


Figura 12 - Curve TEM di resistività elettrica relative alle stazioni di misura Tils-01 (sinistra) e Tils-02 (destra).

Ad oggi non è ancora stato possibile reperire informazioni geologiche per l'isola di Tilos quindi l'interpretazione delle curve è da ritenersi prettamente di carattere geoelettrico.

I modelli 1D elaborati per le due stazioni di misura (Fig.13) mostrano entrambi del materiale superficiale più resistivo che tende a raggiungere una maggiore profondità nella stazione indicata come Tils-02 posizionata nella zona sud-est dell'isola. In particolare, il modello Tils-01 è caratterizzato da un andamento decrescente della resistività che, a partire dai 20 m dal p.c., tende gradualmente a diminuire passando da un valore di circa 100 Ωm a 10 Ωm , per raggiungere il valore di 0.1 Ωm intorno ai 50 m di profondità. Il modello Tils-02 mostra una maggiore omogeneità nei primi 100 m di profondità con valori di $\rho > 100 \Omega\text{m}$. Gli strati più profondi sono caratterizzati da una diminuzione di tali valori che intorno ai 130 m circa raggiungono 0.1 Ωm . In entrambi i casi, il materiale sottostante caratterizzato da valori di resistività molto bassi e prossimi a 0.1 Ωm , può essere associato alla presenza dell'acqua di mare.

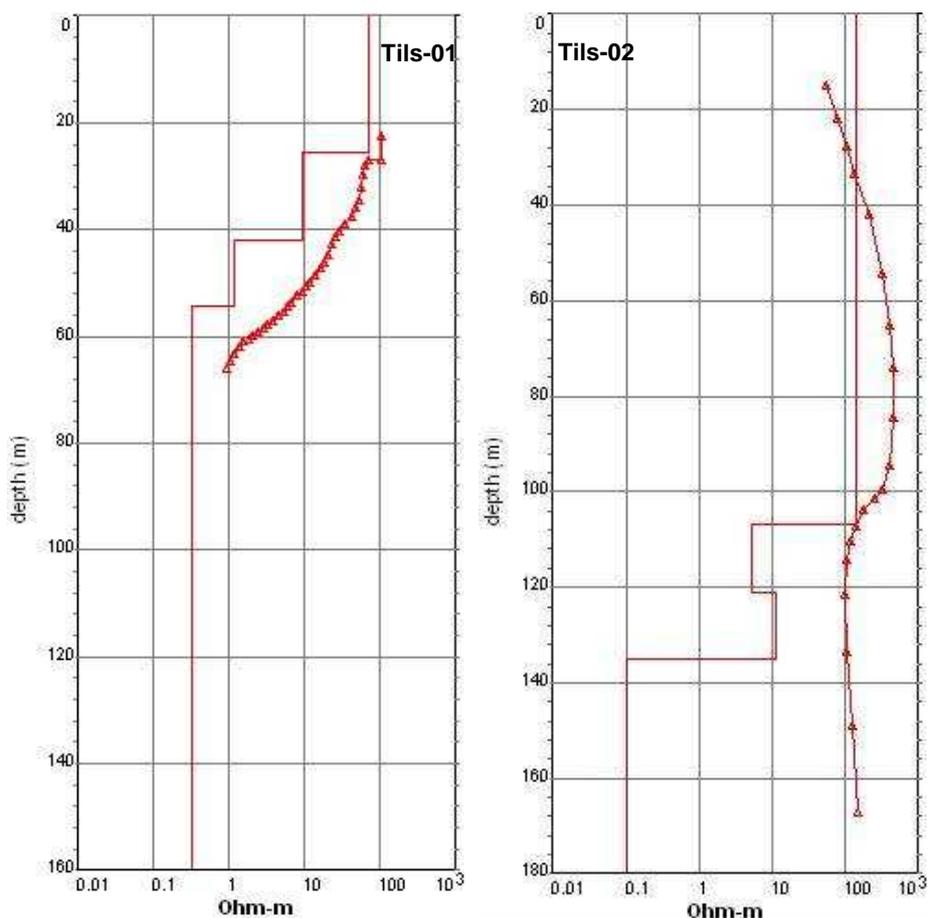


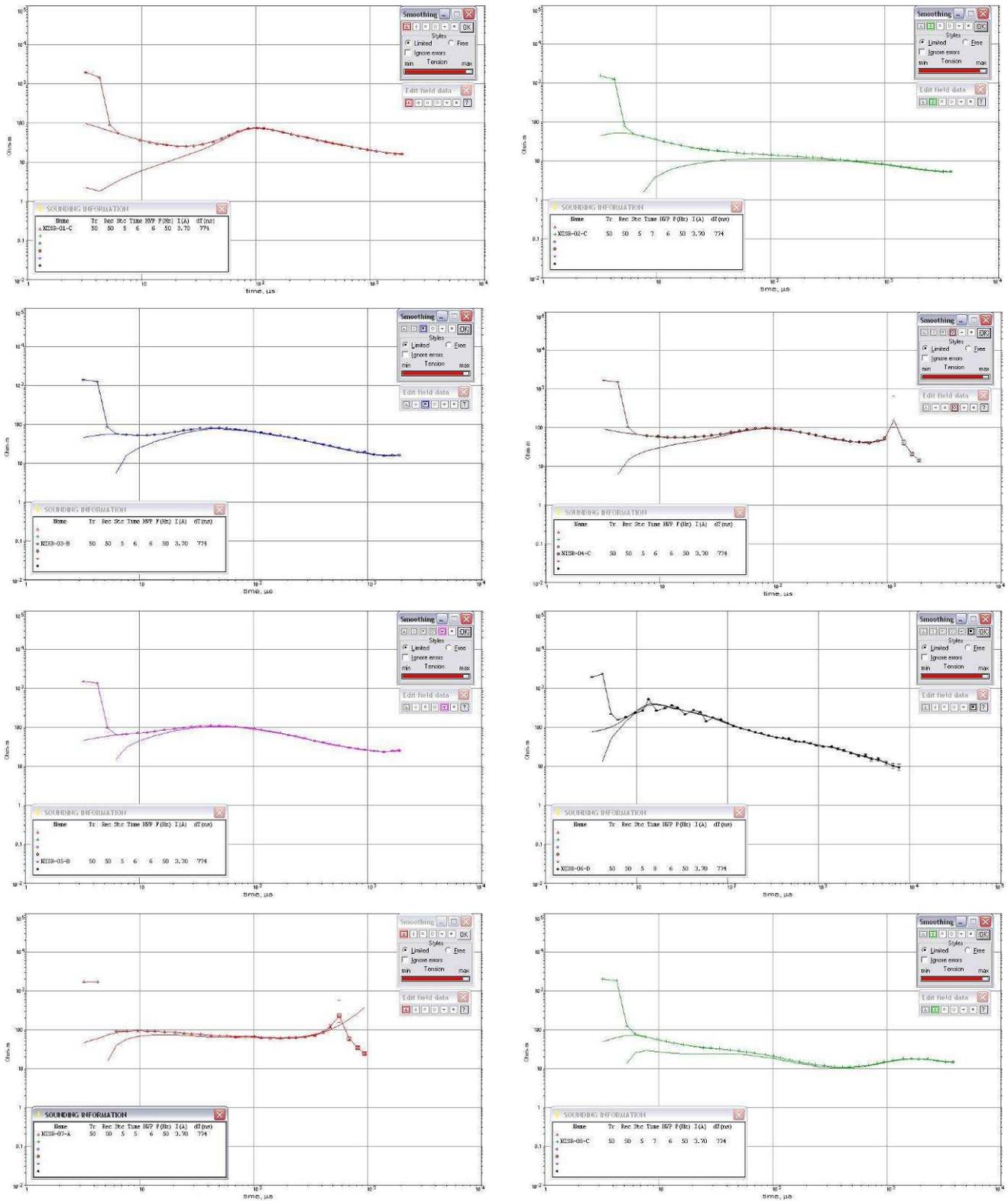
Figura 13 - Modelli TEM 1D ottenuti nelle stazioni di misura Tils-01 (sinistra) e Tils-02 (destra).

Nell'isola di Nisyros, a differenza degli altri test site, oltre ad effettuare i due sondaggi MT e TEM negli stessi punti (indicati in mappa come Nisr-01 e Nisr-02), si è deciso di effettuare un profilo TEM all'interno del cratere con lo scopo di ricostruire l'assetto geoelettrico superficiale e di verificare la presenza di eventuali lineamenti tettonici (Fig.14).



Figura 14 - Ubicazione delle stazioni di misura TEM e MT nell'isola di Nisyros (sinistra). Zoom relativo alle stazioni di misura TEM utilizzate per ottenere il profilo di resistività elettrica nella caldera (destra). I punti Nisr-01 e Nisr-02 sono quelli relativi alle misure TEM e MT congiunte.

La figura 15 riporta le curve TEM relative a tutte le stazioni di misura utilizzate.



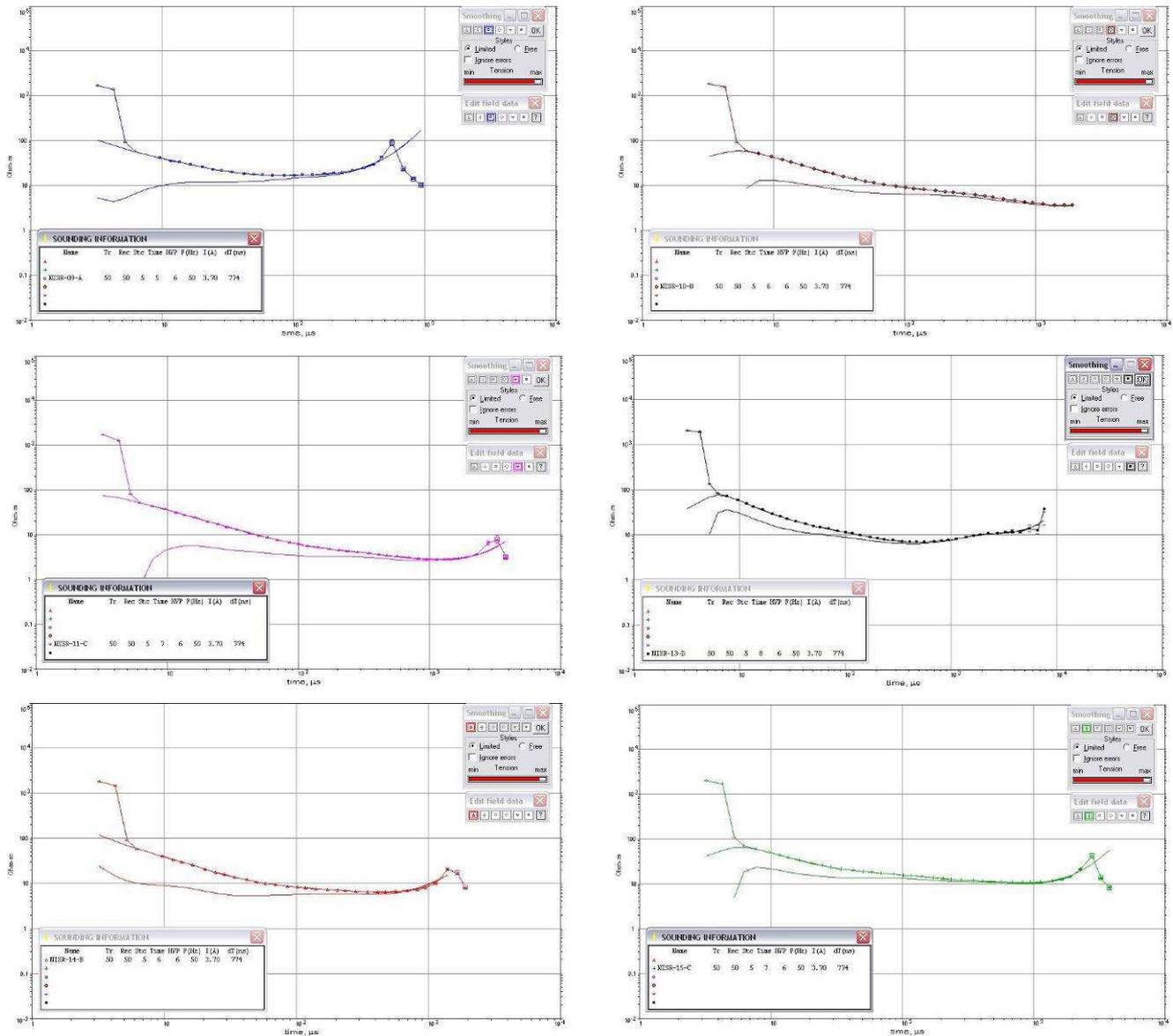


Figura 15 - Curve TEM relative a tutte le stazioni di misura utilizzate nell'isola di Nisyros per ottenere il profilo di resistività elettrico.

La figura 16 che segue rappresenta il modello di resistività elettrico ottenuto dall'interpolazione dei vari sondaggi TEM realizzati nella caldera. Si nota una stratificazione orizzontale con materiale relativamente più resistivo ($10 < \rho < 50 \Omega\text{m}$) in superficie e più conduttivo ($\rho < 10 \Omega\text{m}$) in profondità ed un grosso pacco di materiale resistivo ($\rho > 50 \Omega\text{m}$) al centro. In corrispondenza della stazione di misura Nisr-08 è ben visibile una discontinuità verticale che potrebbe essere associata alla presenza di una struttura tettonica.

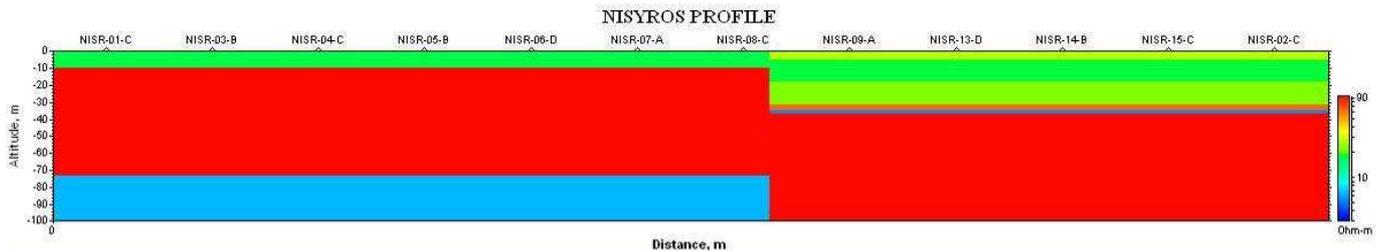


Figura 16 - Modello di resistività elettrico 2D ottenuto dalle misure TEM effettuate nella caldera dell'isola di Nisyros.

Sovrapponendo il profilo di misura TEM (linea celeste) sulla carta geologica (Fig.17) si evince che nel primo punto di misura (Nisr-01), realizzato più lontano dal cratere, lo strato vulcanico più resistivo (strato intermedio nel profilo di resistività elettrico) è intercettato ad una minore profondità dal p.c. rispetto al secondo punto (Nisr-02), realizzato nei pressi del cratere. Ciò può essere dovuto alla presenza di un lineamento tettonico che ha ribassato il settore sud-ovest; tale lineamento, che intercetta il profilo di misura realizzato, è visibile come prolungamento della faglia avente direzione NO-SE riportata nella carta geologica e che taglia quasi completamente la caldera.

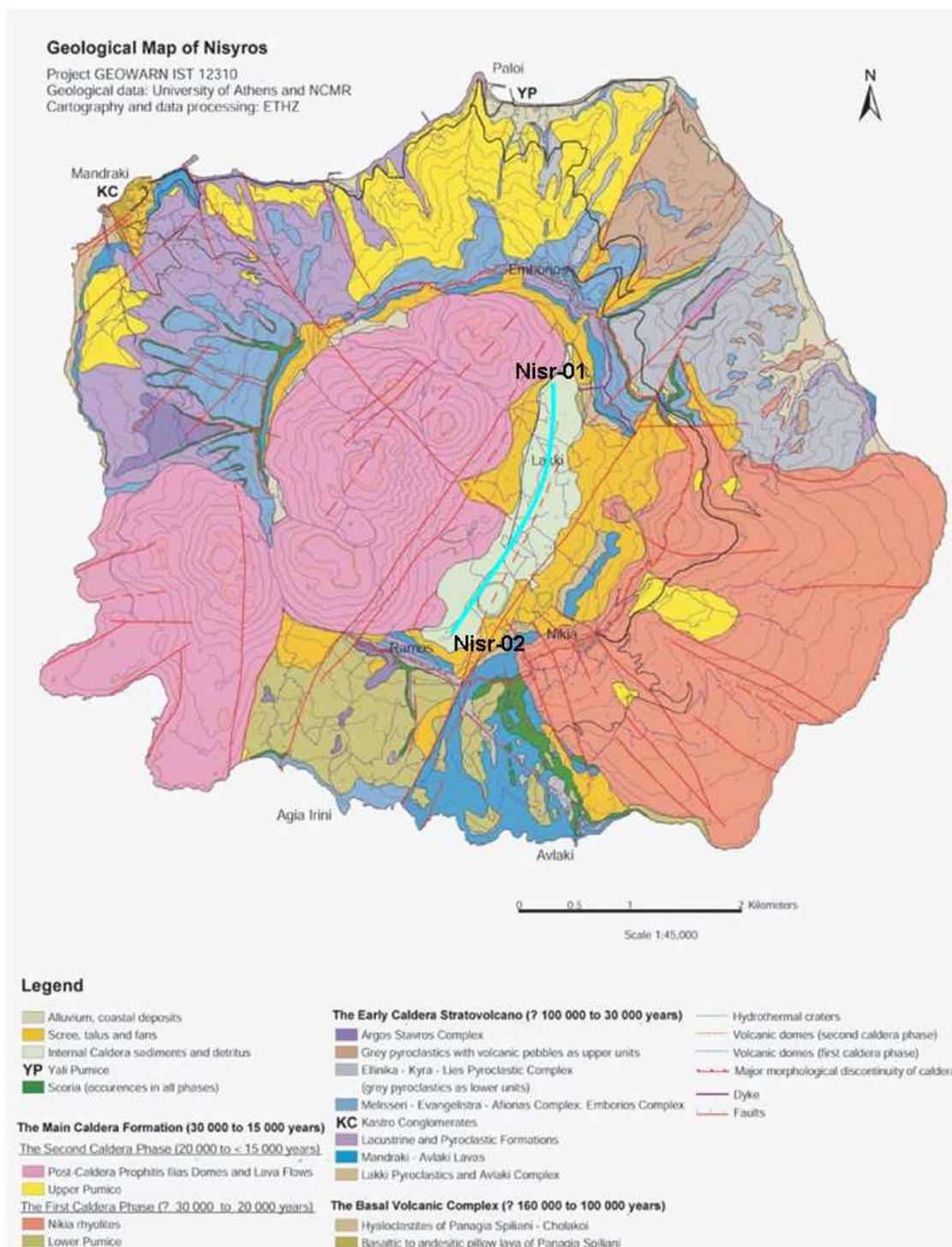


Figura 17 - Mappa geologica dell'isola di Nisyros (Projetc GEOWARN IST 12310 - <http://www.geowarn.ethz.ch>) con ubicazione della traccia del profilo TEM (linea celeste).

Le figure 18 e 19 riportano, rispettivamente, l'ubicazione delle stazioni di misura nell'isola di KOS e le curve TEM ottenute nelle due stazioni.



Figura 18 - Mappa dell'isola di KOS da Google earth con ubicazione delle stazioni di misura TEM e MT.

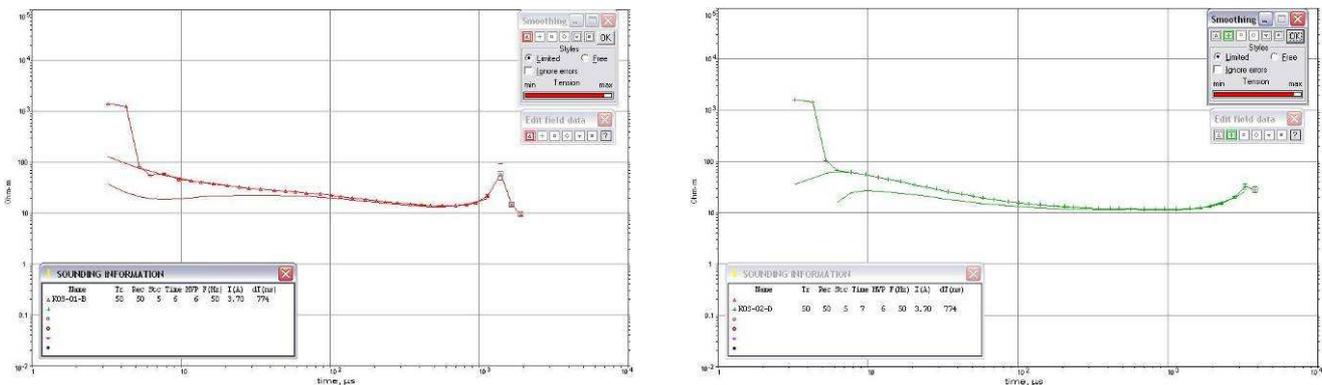


Figura 19 - Curve di resistività elettrica ottenute dalle misure TEM effettuate nelle stazioni Kos-01 (sinistra) e Kos-02 (destra).

I modelli 1D ottenuti nell'isola di KOS (Fig.20) sono geoelettivamente confrontabili, nonostante le stazioni di misura siano posizionate in due zone dell'isola diverse e ben distanti. Entrambi i modelli mostrano in superficie tre strati di materiale relativamente poco resistivo ($10 < \rho < 70 \Omega\text{m}$) che, ad una profondità di circa 70-80 m, lasciano il posto a materiale più resistivo ($\rho > 10^3 \Omega\text{m}$). Ubicando i punti di misura sulla mappa geologica in figura 21, si evince che nel caso di Kos-01 il materiale superficiale è ascrivibile a depositi alluvionali, mentre la stazione Kos-02 è posizionata su materiale di natura vulcanica (Zananiri et al., 2006). Considerati però i bassi valori di resistività che caratterizzano i primi 70 m del modello Kos-02, è plausibile ipotizzare che il materiale vulcanico in quella zona sia fortemente fratturato favorendo la presenza di un maggior contenuto di acqua.

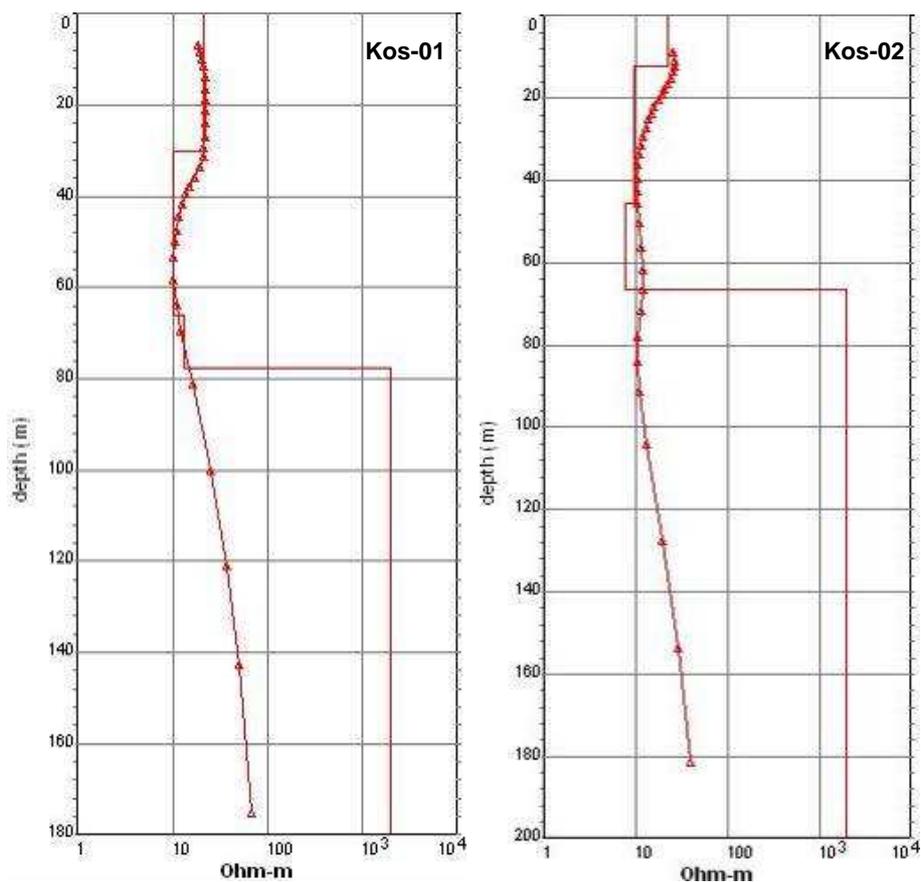


Figura 20 - Modelli di resistività elettrica 1D ottenuti dalle stazioni di misura TEM indicate come Kos-01 (sinistra) e KOs-02 (destra).

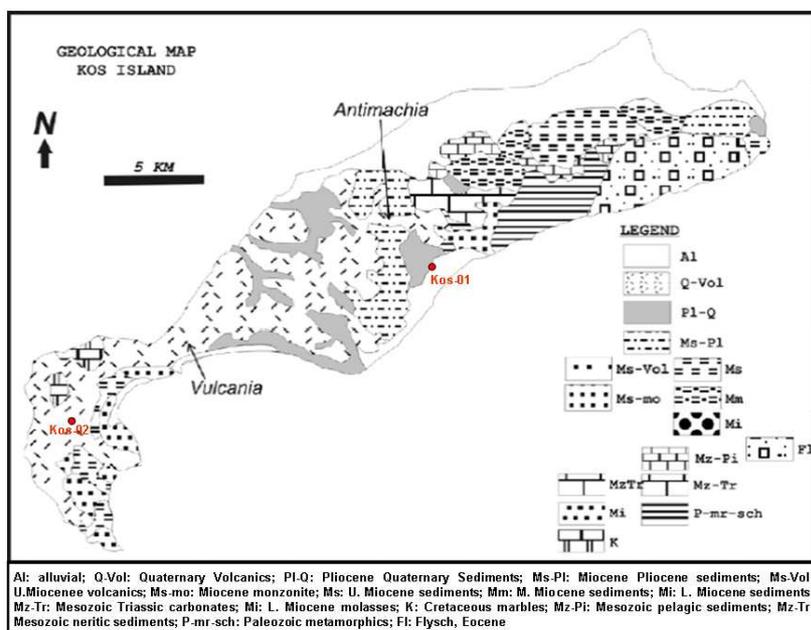


Figura 21 - Mappa geologica (in Zananiri et al., 2006; modificata dopo Papanikolaou e Lekkas, 1990) con ubicazione delle stazioni di misura TEM e MT.

L'intera campagna di misure si è conclusa nell'isola di Astipalaia dove le condizioni logistiche sono risultate essere le peggiori soprattutto per l'installazione dei sensori magnetici ed elettrici della MT. Nell'isola affiorano infatti rocce metamorfiche particolarmente competenti che hanno reso difficili le operazioni di scavo. Ciò ha richiesto lo spostamento delle stazioni di misura che, rispetto alle altre isole, risultano essere molto vicine tra loro (Fig.22). Anche in questo caso è stato difficile reperire informazioni di tipo geologico e quindi si è proceduto solo ad una interpretazione dei modelli di tipo geoelettrico.

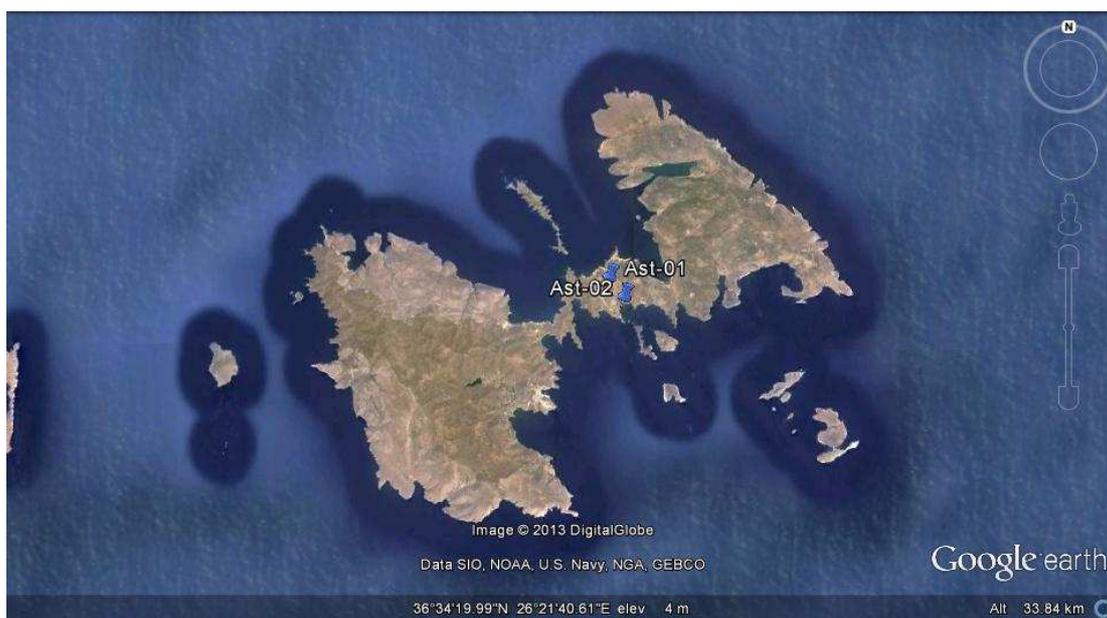


Figura 22 - Mappa dell'isola di Astipalaia da Google earth con ubicazione delle stazioni di misura TEM e MT.

La figura 23 che segue mostra le curve TEM ottenute nei siti Ast-01 (a sinistra) e Ast-02 (a destra), mentre in figura 24 sono mostrati i due modelli 1D.

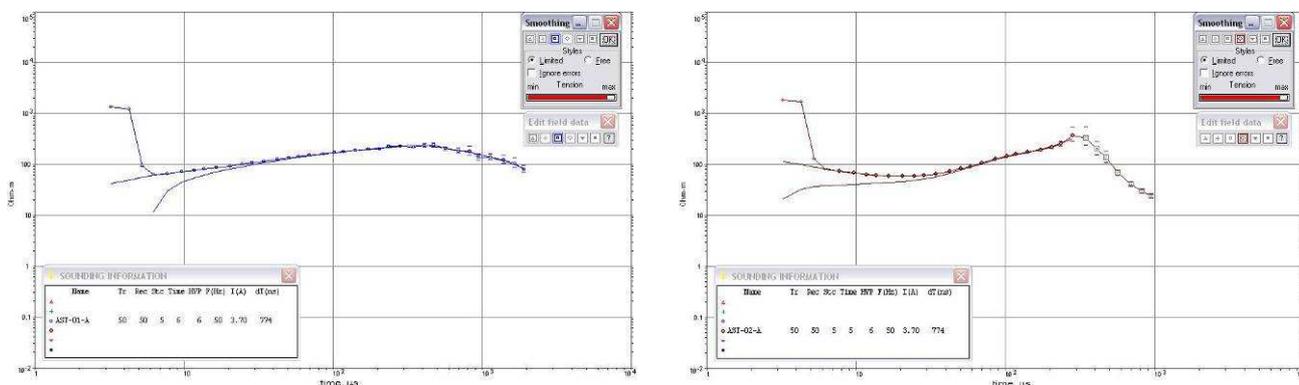


Figura 23 - Curve di resistività elettrica ottenute dalle misure TEM effettuate nelle stazioni Ast-01 (sinistra) e Ast-02 (destra).

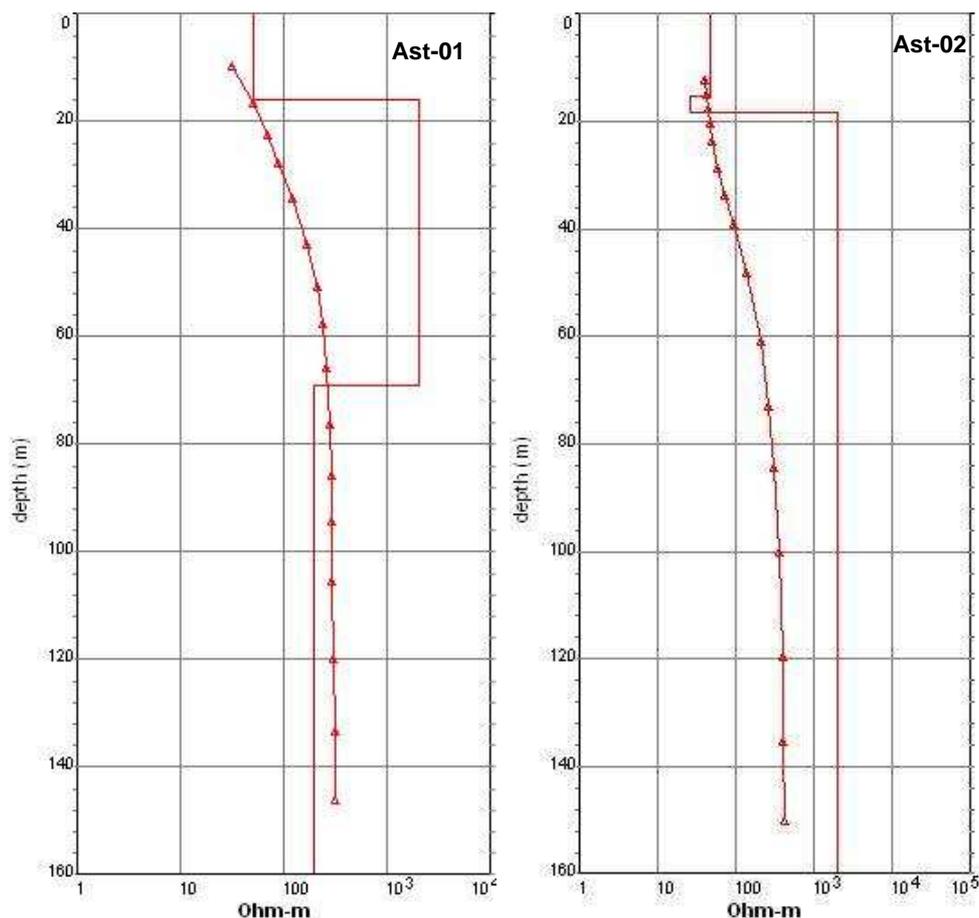


Figura 24 - Modelli di resistività elettrica 1D ottenuti dalle misure TEM effettuate nelle stazioni Ast-01 (sinistra) e Ast-02 (destra).

I modelli mostrano una configurazione elettrostratigrafica dei due siti in parte confrontabile: entrambi sono caratterizzati da uno strato superficiale di materiale relativamente resistivo ($\rho \sim 100 \Omega\text{m}$) che poggia intorno ai 20 m circa su materiale più resistivo ($\rho > 10^3 \Omega\text{m}$). Il modello ottenuto nella stazione Ast-01 mostra una diminuzione della resistività ($\rho \sim 100 \Omega\text{m}$) a circa 70 m di profondità.

V. Conclusioni e sviluppi futuri

L'attività di ricerca svolta durante i 21 giorni trascorsi ad effettuare campagne di misure geofisiche nelle isole del Mar Egeo sud orientale in collaborazione con i ricercatori del TEI di Creta, si è concentrata sull'applicazione di due diversi metodi di indagine elettromagnetica al fine di ricostruire l'assetto elettrostratigrafico di una porzione della zona di subduzione dell'arco Ellenico.

I dati MT acquisiti in tutti i siti test con lo scopo di ricostruire l'assetto geoelettrico profondo dell'arco ellenico sono ancora oggetto di processing e richiedono un approfondimento, nonché lo svolgimento di ulteriori campagne di misura per poter infittire la rete di punti e, quindi, aumentare il numero di informazioni utili al raggiungimento dello scopo.

Il processing e l'interpretazione preliminare dei dati TEM hanno evidenziato le caratteristiche elettriche dei primi 150 m di sottosuolo nelle isole investigate. Al momento i modelli ottenuti sono stati solo in parte confrontati con informazioni di natura geologica ritrovate in bibliografia. Si sta comunque procedendo al reperimento di eventuali sondaggi diretti e, quindi, di informazioni stratigrafiche che sarebbero indubbiamente utili al fine della calibrazione dei dati elettromagnetici.

Lo svolgimento delle attività previste dal programma di mobilità ha ampliato il quadro di conoscenze su alcuni metodi elettromagnetici utilizzabili per lo studio di aree a geologia complessa.

In particolare, le molteplici misure realizzate in contesti geologici differenti hanno evidenziato vantaggi e svantaggi del metodo TEM. Questo ultimo, soprattutto per le caratteristiche tecniche della strumentazione utilizzata, risulta essere molto speditivo consentendo di effettuare misure anche in condizioni logistiche poco confortevoli. La criticità principale è legata all'analisi del dato e alla sua inversione. Le informazioni che si ottengono sono poco quantitative richiedendo spesso, per la loro taratura, l'utilizzo congiunto di altri metodi di indagine geofisica o metodi diretti.

La campagna effettuata e l'ottima sinergia creatasi con i colleghi del TEI ha ulteriormente consolidato la collaborazione già in essere tra l'IMAA-CNR e l'istituto ospitante, portando alla pianificazione di nuove campagne di misura volte non solo a concludere quanto iniziato nel mese di maggio ma anche ad approfondire alcuni temi. È in fase di discussione la possibilità di sottomettere una proposta progettuale, che si inserisca in un contesto europeo, volta alla caratterizzazione geoelettrica più superficiale di aree maggiormente complesse dal punto di vista dell'assetto geologico-strutturale (es. aree vulcaniche), mediante l'utilizzo congiunto di dati elettromagnetici e geoelettrici. Tale proposta vedrebbe tra i siti test anche l'isola di Nisyros in cui le prime indagini hanno già dato risultati interessanti.

Inoltre, il miglioramento del processing e dell'inversione dei dati MT e TEM già acquisiti, il reperimento di altre informazioni di tipo diretto (geologico-strutturali, litologiche e stratigrafiche) e la taratura dei dati elettromagnetici con tali dati, favoriranno la stesura di lavori scientifici da sottomettere a riviste internazionali.

VI. Ringraziamenti

Si ringraziano:

- il CNR, per la concessione del finanziamento nell'ambito del programma di "Short Term Mobility 2013" con il quale la presente attività di ricerca è stata svolta;
- il TEI, per le facilities (strumentazione e mezzi di trasporto) messe a disposizione durante il periodo di misure in campo;
- il prof. Vallianatos e la dr.ssa Kalispera, per la collaborazione fornita, per l'organizzazione della campagna di misure utile all'acquisizione dei dati utilizzati ed analizzati nell'ambito della presente attività di ricerca e per il supporto fornito in fase di processing ed interpretazione dei risultati.

VII. Bibliografia

- Angelier, J. (1976). Sur la neotectonique de l'arc egeen externe: les failles normales Est-Quest et l'extension submeridienne cretoise. C.R. Acad. Sci. Paris, (D), 282, 413-416. (in French).
- Cagniard, L. (1953). Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting. *Geophysics* 18: 605-645.
- Hayakawa, M., Y. Fujinawa (Eds.) (1994). *Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction*, TERRAPUB, Tokyo, 677 pp.
- Huang, Q. and Liu, T. (2006) Earthquakes and tide response of geoelectric potential field at the Niijima station, *Chinese J. Geophys.*, 49: 1745-1754.
- Le Pichon, X. and Angelier, J. (1979). The hellenic arc and trench system: a key to the neotectonic evolution of the Eastern Mediterranean area. *Tectonophysics* 60: 1-42.
- McNeill, J.D. (1980). Applications of transient electromagnetic techniques. Geonics Limited Technical Note TN-7.
- MT24/LF System Operation and Maintenance Manual (2003) ElectroMagnetic Instruments, Inc.
- Nabighian, M.N. and Macnae, J.C. (1991). Time domain electromagnetic methods. *Electromagnetic methods in applied geophysics 2: Applications*, chapter 6, Nabighian, M.N. (Ed.), SEG Publ., 427-520.
- Nagao, T., Y. Enomoto, Y. Fujinawa, M. Hata, M. Hayakawa, Q. Huang, J. Izutsu, Y. Kushida, K. Maeda, K. Oike, S. Uyeda, and T. Yoshino, 2002: Electromagnetic anomalies associated with 1995 Kobe earthquake. *J. Geodynamics*, 33: 401-411.
- Nikolintaga, I., Karakostas, V., Papadimitriou, E., and Vallianatos, F. (2008). The 2006 Kythira (Greece), Mw6.7 Slab-pull event: Tectonic implication and the geometry of the Hellenic Wadati-Benioff zone, *Annals of Geophysics*, Vol.51, No.5-6: 823-837.

- Papanikolaou, D., Lekkas, E. (1990). Miocene tectonism in Kos, Dodecanese islands. IESCA 1990, Abstract 179-180.
- Pirazzoli, P. A., J. Laborel and S. C. Stiros 1996 Earthquake clustering in the Eastern Mediterranean during historical times. *J. Geophys. Res.*, 101, B3, 6083-6097.
- Seidel, M. (2003). Tectono-sedimentary evolution of middle Miocene supra-detachment basins (Western Crete, Greece). Ph.D. Thesis. Universität zu Köln.
- Stiros, S. (2001). Rapid subsidence of Thessaloniki (Northern Greece) coastal plain, 1960-1999. *Engineering Geology*, 61: 243-256.
- Taymaz, T., Jackson, J.A., and McKenzie, D., 1991. Active tectonics of 1954, in Sophades (Central Greece), *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 87, 885–895.
- ten Veen, J.H., and Kleinspehn, K.L. (2002). Geodynamics along an increasingly curved convergent plate margin : Late Miocene-Pleistocene Rhodes, Greece. *Tectonics*, 21 (3): 8_1-8_21.
- Tikhonov, A. N. (1950). Determination of the electrical characteristics of the deep strata of the earth's crust: *Doklady Akadamaia Nauk*,73: 295–297.
- Tzanis, A., and Vallianatos, F. (2002). A physical model of electrical earthquake precursors due to crack propagation and the motion of charged edge dislocations. (monograph) "Seismo Electromagnetics (Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling)" by TERRAPUB, 2002.
- Vallianatos, F., Makris, J. (2000). On the tectonoelectric zonation in the Hellenic Arc". *Phys. Ch. P. A.*, 25(3): 307-313.
- Zananiri, I., Memou, T., Lachanas, G. (2006). Vertical Electrical Sounding (VES) survey at the central part of Kos Island, Aegean, Greece. *Geosciences* 2006.

Firma del Fruitore

Dr.ssa Angela Perrone