## IL METODO AIRBORNE EM PER LA GEOLOGIA APPLICATA: IL WORKSHOP DI GEOITALIA

**ANTONIO MENGHINI** 

Geofisico
am@aarhusgeo.com

ANDREA VIEZZOLI

Geofisico
av@aarhusgeo.com

Nell'ambito di Geoitalia 2011, svoltosi lo scorso mese al Lingotto di Torino, è stato organizzato un Workshop sul metodo airborne elettromagnetico (AEM), applicato all'idrogeologia, alla geotecnica e all'ambiente. Questa tecnica geofisica è in grado di fornire informazioni di estremo dettaglio, con una risoluzione laterale notevole, nell'ordine di poche decine di metri, e sino a notevoli profondità (mediamente oltre i 200 m), coprendo zone molto vaste, nell'ordine di decine o centinaia di kmq.

Per tali motivi si tratta sicuramente di un metodo estremamente idoneo per lo studio del territorio su scala comunale, provinciale o regionale. I campi di applicazione sono quelli connessi alla distribuzione della resistività elettrica, il parametro fornito dall'inversione dei dati: dalla ricerca delle acque sotterranee, allo studio di fenomeni franosi, dalla ricerca di aree contaminate, allo studio dell'intrusione marina lungo le fasce costiere.

Ovviamente, considerati i costi fissi

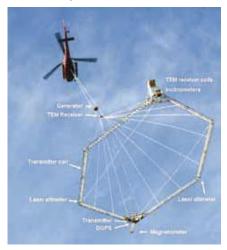


Foto 1: Il sistema Sky TEM visto da terra. Si possono riconoscere tutti gli strumenti utilizzati per la realizzazione del sondaggio TEM vero e proprio (trasmettitore e ricevitore) e quelli per la navigazione ed il controllo del sistema (GPS, laser, inclinometri). In questo caso è stato montato anche un magnetometro per l'acquisizione del campo geomagnetico, rilevato durante le fasi di spegnimento del sistema trasmittente.



Foto 2: Il sistema SkyTEM visto dall'elicottero. Il loop trasmittente presenta una forma esagonale, di lato pari a 22 m. Al centro l'unità ricevente che registra i dati ed il generatore di corrente. Sulla sinistra si vede il coil ricevente.

di movimentazione delle attrezzature, il metodo diventa economicamente vantaggioso solo nel caso sia necessario indagare superfici molto vaste, nell'ordine di diverse decine di kmq: a parità di densità di misure, qualsiasi confronto con la classica geofisica "a terra", risulta enormemene vantaggioso, sia in termini di costi che di tempi di esecuzione. Tanto per fornire un'idea grossolana sui costi, si tenga conto che l'acquisizione e l'inversione dei dati per km lineare può variare dai 100 ai 200 Euro.

È senza dubbio questo uno dei motivi per cui il Ministero dell'Ambiente Danese ha inserito le prospezioni airborne EM come propedeutiche, nell'ambito di un grande progetto nazionale sullo studio e sulla tutela delle acque sotterranee (Moller et al., 2009). Anche il Servizio Geologico Statunitense sta avviando una iniziativa simile, mentre quello Australiano le utilizza anche per identificare zone idonee per la ricarica artificiale degli acquiferi.

La prospezione AEM è in grado di fornire la distribuzione tridimensionale della resistività elettrica (sia laterale che in profondità). Si possono poi ricavare informazioni derivate, come la geometria e la profondità di acquifero o di un acquiclude.

Nei sistemi airborne da elicottero (HTEM) sia il loop trasmittente che il coil ricevente vengono trasportati su di un'unica struttura solidale, posta a circa 30-40 m da terra. La distanza tra il sistema trasmittentericevente, nell'ordine dei 20 m, rende minimo il disturbo arrecato dal veivolo (Foto 1).

Nel loop trasmittente (Foto 2) viene immessa una corrente, di solito in forma di onde quadre, con frequenze di ripetizione variabili da 2,5 a 250 Hz. Nel momento in cui si azzera bruscamente la corrente ("turn-off"), secondo quanto previsto dalla legge di Faraday, si produce un campo elettromagnetico primario, di brevissima durata, che tende ad annullarsi in tempi rapidissimi (nell'ordine dei millisecondi). Questo induce poi delle correnti vacanti nel sottosuolo, che si propagano, col passare del tempo, sempre più in profondità e con un allargamento progressivo, secondo una modalità che ricorda degli anelli di fumo. Queste correnti indotte si dissipano in tempi rapidissimi, producendo a loro volta, un campo elettromagnetico secondario, che viene misurato dal coil ricevente (Foto



Foto 3: Il coil ricevente a terra.

3) in forma di "transiente", ovvero come curva di decadimento del voltaggio (B in Fig. 1).

I valori di voltaggio vengono poi convertiti in valori di resistività apparente, in modo da ricavare una curva di campagna sulla quale si può procedere con le classiche modalità di inversione (C in Fig. 1). Mettendo insieme i dati dei vari modelli, è possibile poi costruire delle mappe di resistività a profondità via via crescenti (D in Fig. 1). La profondità di indagine dipende dalla resistività degli strati attraversati e dal rapporto segnale-rumore. Per incrementare quest'ultimo si ricorre generalmente all'ampliamento del loop o all'incremento dell'intensità di corrente.

Le misure vengono effettuate in continuo, ma di solito vengono "stacked" ad intervalli di circa 1,5 secondi, per cui, in condizioni di normale trasferimento dell'elicottero, si acquisiscono dati ogni 25 m circa. La spaziatura poi tra un profilo e l'altro viene scelta in funzione del grado di definizione richiesto. Grazie ad un sistema GPS e a due coppie di laser altimetrici e di inclinometri (Foto 1), è possibile tenere sotto controllo, in continuo, la posizione, l'altitudine e le oscillazioni del sistema, in modo da apportare le dovute correzioni. Il processo di elaborazione ed inversione si compone di 4 distinte fasi:

- 1) analisi dei dati di navigazione (GPS, misure altimetriche ed inclinometriche)
- 2) analisi dei dati di voltaggio
- $3) \quad \text{rimozione dei disturbi arrecati dalle infrastrutture (couplings)}$
- 4) inversione dei dati

È importante in questa fase ricorrere ad informazioni esterne, accompagnando l'elaborazione con la visualizzazione interattiva di mappe GIS dove sono localizzate le infrastrutture note. La Fig. 2 mostra un esempio di disturbo indotto da una strada, evidenziato dai valori anomali registrati lungo il profilo di volo (valori in grigio nel profilo in basso a sinistra). Grazie al filtraggio dei dati si ottiene un profilo di misure "pulito", sul quale si può procedere con l'analisi dei dati, rappresentati dalle

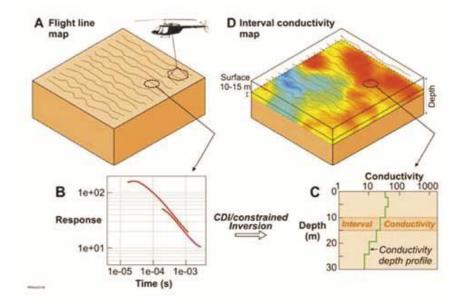


Fig 1: I dati vengono acquisiti lungo linee di volo parallele, separate fra loro tra i 50 e 500 m, in funzione del dettaglio richiesto (A); lungo la linea di volo invece i sondaggi presentano uno spacing di 20-50 m. Per ogni stazione di misura viene estratto il relativo transiente (B), sul quale si procede con un'inversione 1D (C) che mostra la variazione di conducibilità (o resistività) con la profondità. Grazie alla georeferenziazione di ciascuna stazione, è possibile produrre delle mappe di conducibilità (o resistività), riferite a profondità via via crescenti, in modo da avere un quadro tridimensionale.

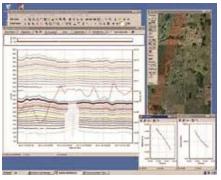


Fig 2: Il processing dei dati viene realizzato in maniera interattiva, in ambiente GIS, tenendo conto anche della georeferenziazione delle misure, così da riconoscere eventuali disturbi determinati dalla presenza di infrastrutture. La figura mostra la rimozione di dati acquisiti sopra una strada, la quale provoca una distorsione del segnale (valori in grigio nel profilo in basso a sinistra). A destra in alto viene mostrata la mappa per localizzare le linee sul territorio. In basso si possono esaminare, per ciascun sondaggio, la curva di voltaggio (a sinistra) e quella di resistività apparente (a destra).

curve di voltaggio (in basso a sinistra) e di resistività apparente in basso a destra).

Ovviamente il metodo non è applicabile in zone intensamente urbanizzate, in quanto il rumore elettromagnetico di fondo diventa inaccettabile: di norma si acquisiscono dati utili ad una distanza di circa 100 m da qualsiasi infrastruttura. Ciò però non vieta di indagare zone densamente abitate, come sperimentato in Danimarca e Germania: i dati acquisiti sopra le aree antropizzate vengono semplicemente rimossi, mentre le informazioni ricavate nelle aree intermedie sono comunque valide.

L'inversione dei dati viene condotta tramite un approccio quasi-3D, fornito dalla Spatially Constrained Inversion (SCI): si tratta di una metodologia (Viezzoli et al., 2008) che, grazie all'uso di vincoli (constraints) orizzontali e verticali, è in grado di trasferire le informazioni ricavate da un singolo modello 1D a tutti quelli circostanti.

I risultati di una prospezione AEM possono essere visualizzati innanzitutto come mappe di resistività, a varie profondità. La Fig. 3 mostra una serie di queste elaborazioni, ottenute dall'inversione di dati raccolti per lo studio di parte della Laguna di Venezia (Viezzoli et al., 2010). Ci troviamo nel settore meridionale della stessa, in prossimità di Chioggia (vedi

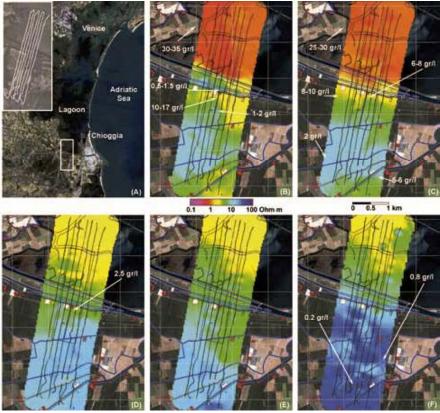


Fig 3: Mappe di resistività ricavate dalla prospezione realizzata sulla Laguna di Venezia (lato Sud, Chioggia). Si passa da 0-5 m di profondità (B) sino ai 100-120 m (F). I toni rossi indicano i valoi più bassi di resistività, determinati dalle acque salmastre, mentre quelli blu sono riconducibili a formazioni più resistive, grossolane, sede di falde dolci. Sono riportati anche i valori di salinità delle acque prelevate da pozzi, confermando la buona corrispondenza con i dati geofisici.

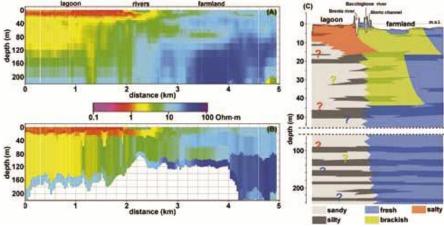


Fig 4: Profilo verticale di resistività estratto dalla prospezione sulla Laguna Veneta. Il profilo corre da Nord a Sud, per cui parte dalla Laguna per poi entrare nella terraferma. In alto a sinistra viene mostrato il profilo ricostruito tenendo conto di una modalità di inversione "multi-strato" (sino ad un massimo di 19 unità), in basso quella a "pochi strati". A destra è raffigurato un modello idrogeologico semplificato che mostra i rapporti tra le varie unità idrogeologiche. E' possibile riconoscere l'intrusione salina da parte delle acque di laguna (a bassa resistività, toni rossi) che passano al di sotto del sistema fluviale costituito dal Brenta, dal Bacchiglione e dal Morto. L'acquifero salmastro è caratterizzato da valori medio-bassi di resistività (toni verde-giallo), mentre quello dolce (toni blu) mostra i valori più elevati. La scala verticale dei profili di resistività è diversa da quella della sezione idrogeologica.

ubicazione in A). A profondità di 0-5 m (B) si mette in luce il comportamento conduttivo (in arancio) delle acque di laguna, con un evidente ingressione nell'entroterra, verso Sud, marcato dai toni gialli. Valori di maggiore resistività (in celeste) indicano la presenza di acque dolci superficiali, anche se, al limite Sud, si torna su valori di elevata conducibilità, per effetto di un fenomeno di by-passaggio delle acque salmastre, al di sotto del reticolo idrografico. Si ha una perfetta corrispondenza tra valori di bassa resistività ed elevata salinità delle acque, campionate da pozzi o sorgenti: le acque di laguna arrivano a toccare valori di 30-35 g/l, mentre quelle dolci più resistive sfioran i 0,5-1,5 g/l.

Scendendo in profondità, a 10-20 m (C), si nota il persistere di valori decisamente bassi di resistività nella laguna, determinato dalla saturazione dei sedimenti di fondo da parte delle acque salmastre. Ancora una volta vi è perfetta corrispondenza tra salinità e resistività elettrica. Le mappe scendono sempre più in profondità, sino a raggiungere i 100-120 m (F), dove si mettono in luce corpi resistivi (in blu) che coincidono con acquiferi dolci imprigionati, caratterizzati ad bassa salinità (0,2-0,8 g/l).

Un altro tipo di rappresentazione dei dati è fornito da sezioni geoelettriche, che mostrano la distribuzione della resistività secondo direzioni stabilite. La Fig. 4 mostra una sezione, di 5 km di lunghezza, estratta dalla stessa indagine, che taglia la zona da Nord-Est a Sud-Ovest e che mostra in maniera più chiara i rapporti laterali tra acque salmastre e dolci. Si ha modo di verificare una buona corrispondenza tra struttura idrogeologica (sezione a destra) e struttura geofisica (a sinistra), rappresentata secondo un modello a più strati (in alto a sinistra) e a pochi strati (in basso a sinistra).

I risultati possono poi essere rappresentati tramite mappe di tematismi derivati, come ad esempio la geometria sepolta di un particolare elettrostrato: la Fig. 5 riporta una carta strutturale del substrato argilloso conduttivo che sostiene l'acquifero sabbioso-ghiaioso glaciale, in un'ampia zona della Danimarca (Siemon et al., 2009). È evidente la notevole capacità di risoluzione laterale del metodo, in grado di mettere in luce tutta una serie di paleovalli sepolte (dove la quota assoluta del substrato argilloso scende al di sotto

di -100 m s.l.m.), colmate da materiale più grossolano e sede di una cospicua circolazione idrica sotterranea. Il dettaglio raggiunto è senz'altro notevole, considerata anche la grande estensione dell'area (circa 150 kmq), inimmaginabile se si fosse fatto riferimento ai pochi pozzi noti o alla sola

geofisica a terra.

La Fig. 6 conferma la prevalenza di litologie più grossolane (più resistive) all'interno delle stesse paleovalli, all'interno delle quali si verifica una cospicua circolazione idrica.

In conclusione, si ritiene che il

metodo airborne EM possa essere vantaggiosamente applicato nell'ambito di progetti idrogeologici a grande scala, dove cioè sia richiesta la copertura di ampie superfici, in tempi ragionevoli, senza rinunciare al necessario dettaglio laterale e ad una profondità di investigazione medioalta.

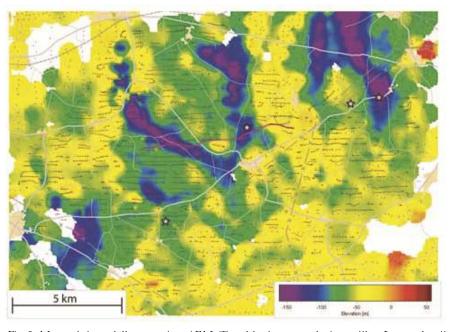


Fig. 5: Mappa derivata dalla prospezione AEM. Tetto del substrato conduttivo argilloso.Le zone dove il substrato raggiunge i minimi (toni blu) indicano la presenza di paleovalli di origine glaciale.

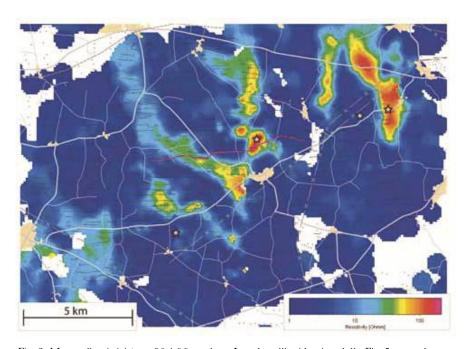


Fig 6: Mappa di resistività a –80/-90 m s.l.m. Le paleovalli evidenziate dalla Fig 5 sono colmate speso da materiale più resistivo (in rosso) ad elevata permeabilità, sede quindi di cospicua circolazione idrica.

## **BIBLIOGRAFIA**

MOLLER I., SONDERGAARD V.H., JORGENSEN F., AUKEN E., CHRISTIANSEN A.V. (2009): Integrated management and utilization of hydrogeophysical data on a national scale. Near Surface Geophysics 7, 647-659.

SIEMON B., CHRISTIANSEN A.V., AUKEN E.(2009): A review of helicopter-borne electromagnetic methods for groundwater exploration. Near Surface Geophysics 7, 629-646.

VIEZZOLI A., CHRISTIANSEN A.V., AUKEN E., SORENSEN K.I. (2008): Quasi-3D modelling of airborne TEM data by spatially constrained inversion. Geophysics 73, F105-F113.

VIEZZOLI A., TOSI L., TEATINI P., SILVESTRI S. (2010): Surface water-groundwater exchange in transitional coastal environments by airborne electromagnetics: The Venice Lagoon example. Geophysical Research Letters 37, L01402.