

LA GEOFISICA APPLICATA AI BENI AMBIENTALI E CULTURALI: METODOLOGIE INTEGRATE DI VALUTAZIONE DELLE RISORSE E DEI RISCHI

E. Bozzo - F. Merlanti

Dipartimento di Scienze della Terra, Sezione Geofisica, Università di Genova, Genova

RIASSUNTO - *La geofisica applicata ai beni ambientali e culturali: metodologie integrate di valutazione delle risorse e dei rischi* - Il Quaternario, 7(1), 1994, 465-472 - I parametri geofisici ed il loro contenuto informativo forniti dalla geofisica applicata al fine di caratterizzare le strutture geologiche coinvolte nella gestione del territorio e nella pianificazione degli interventi, indicano come queste tecniche di esplorazione indiretta possono essere proficuamente riconvertite, a più piccola scala, in altri settori dove più urgente e pressante è la domanda di conoscenza e di interdisciplinarietà degli apporti scientifici. Così le discipline storiche e la gestione dei beni culturali possono trarre giovamento da un approccio più sistematico all'esplorazione di nuove risorse ed alla conservazione di quelle esistenti. Questa impostazione avanzata vede operanti discipline come quelle geofisiche in un contesto interpretativo che fino al decennio scorso poteva apparire assolutamente inusuale. Così l'impatto ambientale della gestione e dello smaltimento dei rifiuti, la tutela ed il ripristino di aree interessate da questo fenomeno sempre più in emergenza, richiedono la conoscenza di parametri fisici sempre meno estrapolati, più affidabili e valutati in modo integrato con altri a loro strettamente correlati. Così le risorse del sottosuolo in primo luogo quelle idriche sempre meno rinnovabili e sempre più oggetto di approvvigionamento alternativo o sostitutivo a causa di acquiferi compromessi, richiedono per la loro individuazione una molteplicità di indagini che necessariamente saranno in buona parte speditive e non distruttive quali quelle geofisiche. Le informazioni ricavate forniranno gli strumenti più efficaci per l'elaborazione di strategie di intervento. Le applicazioni geofisiche descritte in questo lavoro rappresentano esempi di interventi condotti dagli Autori in diversi settori investiti da problematiche ambientali. Le tecniche utilizzate si riferiscono solo ad alcune delle metodologie geofisiche applicabili agli obiettivi proposti, esse rappresentano comunque, limitatamente ai casi trattati, un fortunato tentativo di integrazione delle informazioni geofisiche ai fini di una più corretta valutazione delle risorse del territorio, dei rischi naturali e di impatto antropico su di esso.

ABSTRACT - *Geophysics applied to environmental and cultural resources: Integrated evaluation methods of resources and hazards* - Il Quaternario, 7(1), 1994, 465-472 - Geophysical parameters and related information, were originally supplied by applied geophysics so as to offer a significant contribution in the description of geological structures involved in territorial management and in the planning of environmental settlements. Recently, these indirect exploration techniques have been usefully converted into smaller scale sectors, where the demand for integrated studies is becoming increasingly necessary. In this sense, historical disciplines and cultural management can benefit from a systematic approach towards the exploration of new resources and the conservation of existing ones. Geophysical studies have become part of a general interpretative scheme which, till a decade ago, would have appeared rather peculiar. Besides, the environmental impact linked with the management and discharge of waste materials and with the protection and recovery of those areas which are concerned with this increasingly spreading phenomenon, require a much deeper and reliable knowledge of physical parameters. These can no longer simply be extrapolated, but need to be evaluated in an integrated and combined manner. Last but not least, natural resources, first of all hydrological ones, appear to be less renewable, thus requiring alternative, or even substitutive supply when aquifers are polluted or unusable. The singling out of these resources requires a variety of investigations which necessarily have to be, in most cases, speedy but not as destructive as standard geophysical ones. The information derived from the surveys also provides effective instruments, which can be used for the elaboration of appropriate settlements. The geophysical applications described in this paper, represent some examples of research dealing with environmental problems conducted by the authors in various fields. The techniques which were adopted are some of the many geophysical methods that could be applied to undertake the environmental tasks the authors had in mind. In any case, these techniques represent, referring to the described cases, a valuable attempt of combined integration of geophysical data so as to achieve a more reliable evaluation of territorial resources, natural hazards and anthropic impacts.

Parole chiave: Geofisica applicata, beni culturali, beni ambientali, risorse, rischi

Key words: Applied geophysics, cultural environmental resources, hazards

1. GEOFISICA APPLICATA ALL'AMBIENTE

Facendo riferimento all'articolazione dello studio di fattibilità che il CNR nel marzo 1990 ha presentato per il Progetto Finalizzato: Ambiente e Territorio, si possono inquadrare in modo sintetico i temi affrontati e i campi di interesse nei quali gli Autori si sono impegnati in quest'ultimo quinquennio.

1.1 Geofisica applicata all'analisi e rappresentazione dei sistemi ambientali

Tema: *Tutela, salvaguardia e gestione delle risorse idriche sotterranee*

Questo problema presuppone da un lato la conoscenza degli schemi idrogeologici, dei meccanismi di circolazione, dall'altro il controllo ed il monitoraggio degli acquiferi. Tra gli innumerevoli obiettivi risultano prioritarie metodologie integrate di stima delle risorse idriche nelle diverse situazioni geologiche.

Una ricerca condotta su questo tema è stata indirizzata al potenziamento dell'approvvigionamento idrico nel comune di Bonassola (Liguria Orientale) che ha richiesto indagini geofisiche volte ad individuare nuovi acquiferi (Bozzo *et al.*, 1993a).

Nel caso specifico, la situazione ambientale caratterizzata da ripidi pendii costituiti prevalentemente da litologie serpentinitiche ed argilloscistose e l'improbabile presenza di falde estese nel sottosuolo hanno consigliato l'utilizzo di metodi elettromagnetici VLF (*Very Low Frequency*) e geoelettrici *Offset Wenner* indirizzati all'identificazione di zone fratturate ove maggiore era la possibilità di

canalizzazione delle acque meteoriche (Fig.1).

Sono state esaminate due diverse aree, una su serpentiniti e l'altra su argilloscisti. Le indicazioni fornite dall'integrazione dei due metodi di prospezione hanno permesso di circoscrivere settori specifici ad alta probabilità di reperimento idrico. Le perforazioni eseguite in questi siti hanno condotto all'individuazione di acquiferi con capacità di emungimento superiori ai 2 litri/sec, non eccezionali ma certamente sfruttabili nell'ambito delle necessità locali.

1.2 Geofisica applicata alla circolazione, soglie di rischio, livelli di controllo degli inquinanti ambientali

Tema: *Effetti di inquinanti sui beni culturali e sui manufatti*

L'aggressione da parte degli agenti atmosferici e l'inquinamento ambientale rappresentano la minaccia più seria ad opere d'arte e monumenti. La formazione di croste, lo sgretolamento, l'erosione, l'aumento della porosità, la fessurazione anche profonda dei materiali lapidei denunciano la necessità di maggiori conoscenze sui fenomeni di degrado e la messa a punto di nuove tecnologie relative alla diagnosi del degrado dei manufatti e dei beni culturali.

Tra queste le tecniche geofisiche ad ultrasuoni si sono rivelate adatte a questo tipo di diagnosi. L'applicazione di tali tecniche ai manufatti presuppone un attento studio metodologico sia sui materiali naturali lapidei che sugli artefatti (calcestruzzi ed altro). Una ricerca di questo tipo (Delsante, 1992) sviluppata con apparecchiatura Pundit ad ultrasuoni su alcune decine di materiali lapidei da costruzione (Fig. 2) e di interesse per opere di tipo monumentale ha condotto ad alcune considerazioni sulla loro destinazione d'uso. In generale si è osservato che i campioni "freschi" si raggruppano secondo classi di velocità ultrasonica ben distinte aventi una buona

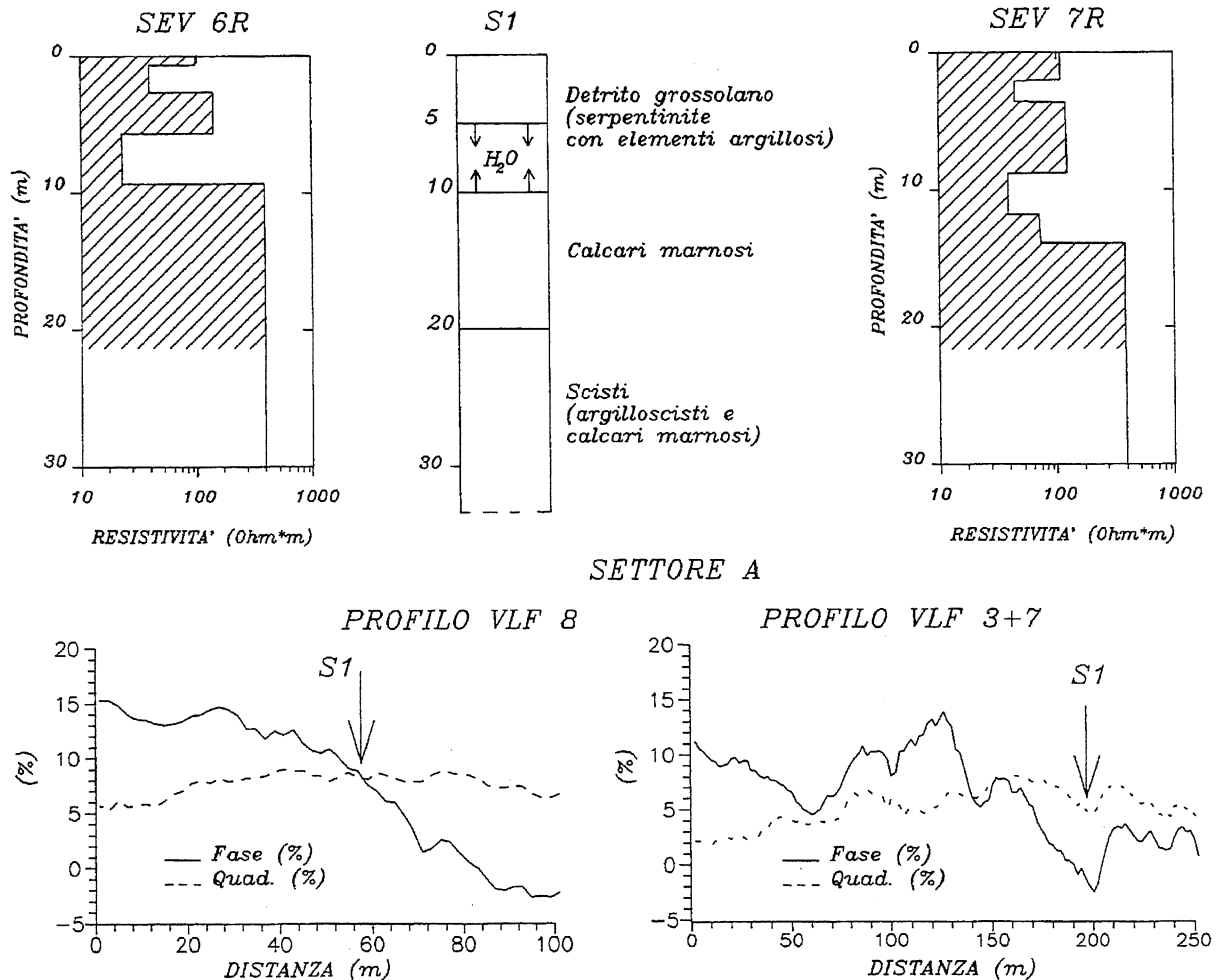


Fig.1 - Bonassola (Liguria Orientale): esempio di prospezione geofisica a scopo idrogeologico. Sono riportate le stratigrafie ricavate da alcuni sondaggi verticali (SEV) ed i profili elettromagnetici VLF che hanno suggerito il posizionamento della perforazione S1. La stratigrafia di S1 trova riscontro con la distribuzione verticale della resistività elettrica fornita dai SEV, in particolare per quanto attiene l'intercezione del livello acquifero.

Bonassola (eastern Liguria): example of geophysical prospecting applied to hydrogeological research. Stratigraphy as given by Vertical Electric Sounding (VES) is shown together with electromagnetic profiles which have given indications on where the S1 borehole had to be located. The S1 stratigraphy is in agreement with vertical electric resistivity distribution data, especially as far as the crossing of groundwater level is concerned.

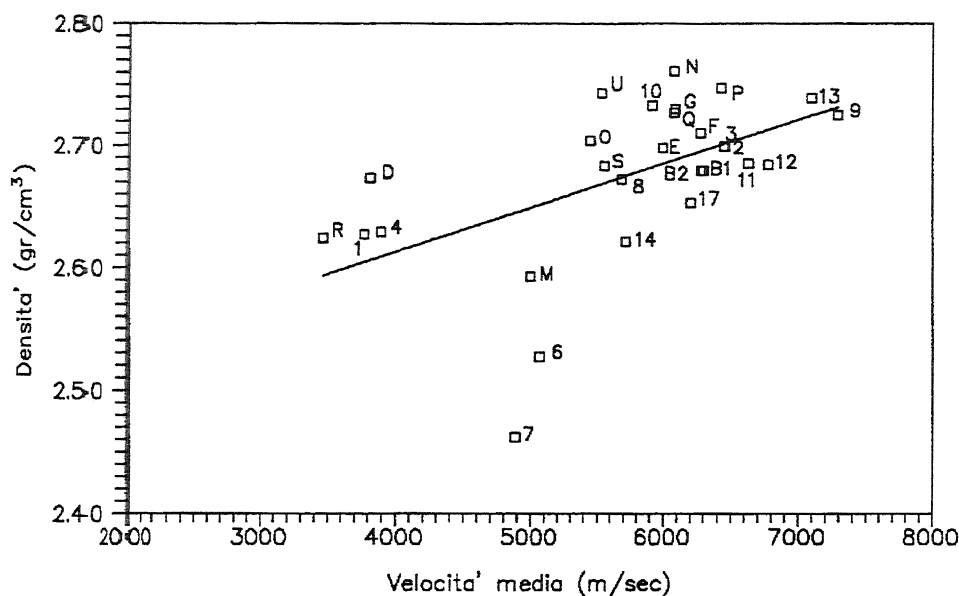


Fig. 2 - Esempio di correlazione tra densità e velocità ultrasonica determinata su campioni di materiali lapidei da costruzione. E' da notare il comportamento anomalo dei materiali serpentinitici (6, 7) nei confronti di quello delle arenarie (1, 4, R, D). Gli altri gruppi, costituiti prevalentemente da calcari, marmi e lherzoliti, risultano tra loro equivalenti. Sono infine da segnalare gli alti valori dei marmi 9 e 13 che superano i 7000 m/s di valore medio.

Relationship between density and ultrasonic wave velocity on samples of building materials. The anomalous behaviour of serpentinitic rocks (samples nos. 6 & 7) with respect to sandstones (samples nos. 1, 4R, and D) is worth noting. The other samples (limestones, marbles, lherzolites) are equivalent to one another. The high values (> 7,000 m/s on the average) of marble samples nos. 9 and 13 are also remarkable.

correlazione con i parametri mineropetrografici. Questa correlazione sembra mancare quasi completamente per i campioni alterati dello stesso materiale. Questa divergenza di comportamento, fatto salvo il comportamento anisotropo di vaste famiglie di rocce, può essere utilizzata per la valutazione di integrità del materiale lapideo.

Data la difficoltà di disporre di un numero elevato di campioni preparati per la misura ultrasonica, e volendo verificare i risultati acquisiti su set di dati statisticamente più significativi, si è fatto uso di provini di calcestruzzo di caratteristiche geotecniche note.

Schematicamente i risultati della ricerca possono essere così riassunti: i) i parametri ultrasonici consentono una buona valutazione dello stato di alterazione dei materiali lapidei; ii) tali parametri mostrano una notevole sensibilità al comportamento anisotropo dei materiali osservati; iii) esistono chiare correlazioni tra la velocità ultrasonica nei materiali lapidei e la loro densità, composizione mineralogica, grana, tessitura, piani di scistosità e fratturazione, porosità e fessurazione.

1.3. Geofisica applicata allo studio delle modifiche recenti, in atto e delle tendenze evolutive dell'ambiente fisico

Tema: *Impatto ambientale dell'attività vulcanica*

Tale attività mostra chiaramente un impatto ambientale di notevole portata anche se relativamente circoscritto nello spazio. Nella definizione di scenari attendibili di impatto ambientale prodotto da eruzioni ed in particolare da colate laviche di vulcani italiani, risulta importante lo studio della dinamica e delle geometrie delle manifestazioni più comuni. Tra queste i canali e tubi di lava.

Una campagna di prospezioni elettromagnetiche è stata effettuata sull'Etna nel giugno 1992, allo scopo di evidenziare alcuni caratteri geofisici del tunnel lavico che alimentava l'effusione della Valle del Bove (Bozzo *et al.*, 1993b).

Le misure sono state eseguite lungo diversi profili, in una zona poco accidentata sopra il tunnel lavico a quota 2000 m s.l.m., immediatamente a monte del punto di deviazione artificiale del flusso lavico operato dalla Protezione Civile.

Le tecniche geofisiche utilizzate sono state: GPR (*Ground Probing Radar*), induzione elettromagnetica con tecniche VLF e magnetometria PPM (*Proton Precession Magnetometer*).

L'obiettivo principale perseguito era quello di risolvere geometricamente la sezione "bagnata" del flusso lavico che scorreva nel tunnel. Questa informazione, unita alla misura della velocità di flusso della lava, può infatti fornire una valutazione diretta della portata. Il tasso di effusione, che corrisponde alla portata nel caso di un unico canale lavico, è strettamente legato alla massima lunghezza raggiunta dal flusso lavico ed è uno dei più importanti parametri fisici che condizionano lo sviluppo delle colate stesse. Il ridotto disturbo geologico ed il forte contrasto delle proprietà elettriche e magnetiche tra la lava fusa e quella incassante ha agevolato l'analisi dei dati ed ha consentito la ricostruzione di una sezione della struttura vulcanica indagata.

Il modello proposto (Fig. 3) è stato ottenuto sulla base di una magnetizzazione "calcolata" assumendo come parametro discriminante la suscettività magnetica (K) dei corpi, in parte misurata direttamente in sito. In esso viene collocato, alla profondità di 2 m, un corpo completamente smagnetizzato di sezione pari a circa 9 m². Il suo baricentro coincide con il flesso del profilo VLF ed è marcato lateralmente da due punti di diffrazione delle onde radar, collocati sugli spigoli superiori del canale sepolto, nella zona di transizione tra la lava solidificata ed il corpo fuso.

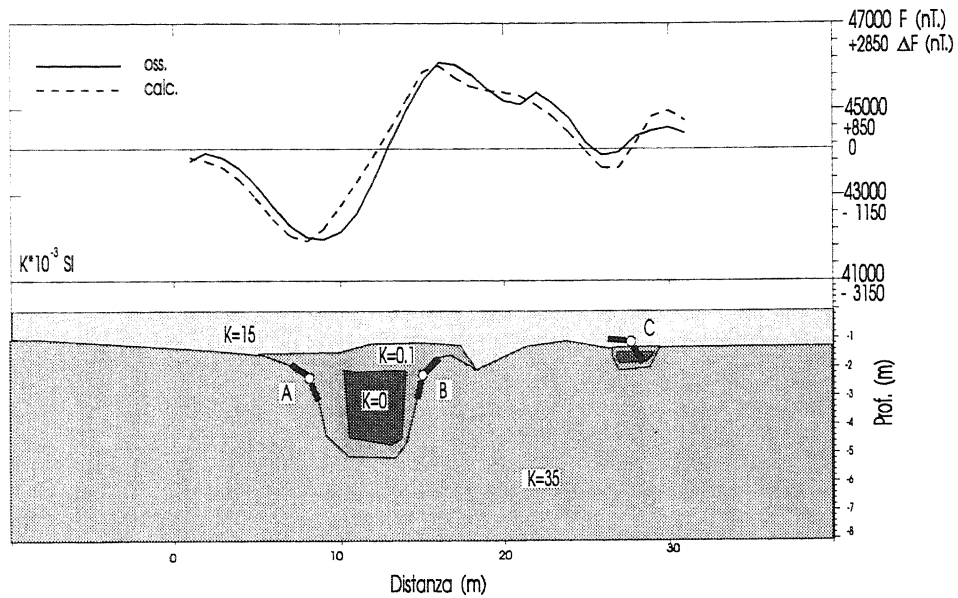


Fig. 3 - Valle del Bove, Etna. Esempio di prospezione a scopo vulcanologico. Modello geofisico integrato ottenuto dalle misure magnetiche, elettromagnetiche induttive VLF e georadar della sezione di un tunnel lavico attivo durante l'eruzione 1991-1993. Nella parte superiore della figura sono riportati il profilo magnetico osservato, il cui posizionamento è stato suggerito dalle misure VLF (non riportate in figura) ed il profilo calcolato secondo il modello indicato nella parte inferiore della stessa figura. In ordinate, con F e ΔF vengono indicati rispettivamente i valori di intensità del campo geomagnetico locale e quelli della sua anomalia calcolata nello stesso punto. Il modello bidimensionale è relativo ad una sezione di 30 m x 6 m di profondità. Con K vengono indicati i contrasti di suscettività magnetica dei materiali vulcanici (il fuso avendo una temperatura superiore a quella di Curie ha un $K = 0$). A, B e C indicano i fulcri di massima diffrazione, localizzati dalla tecnica GPR, in prossimità del tunnel principale (A e B) e di una piccola area di incipiente fusione (C).

Etna volcano, loc. Valle del Bove. Example of geophysical prospecting for volcanological purposes. Integrated model of a 1991-1993 eruption lava tunnel obtained from magnetic, inductive electromagnetic and georadar data. The observed magnetic profile — located on the basis of electromagnetic measurements — and the profile calculated from the model shown in the lower part of the figure, are shown in the upper part of the figure. F and ΔF indicate the geomagnetic field local intensity and that of the Bouguer anomaly calculated for the same site. The 2D model refers to a section 30 m x 6 m in depth. K is the magnetic susceptibility contrast of volcanic materials (K of melts having a temperature higher than the Curie one is equal to 0). A, B, and C show the maximum diffraction points obtained with the GPR technique near the lava tunnel (A and B) and near a small melting area (C).

Tema: Ricerche paleoidrologiche attraverso studi geomorfologici: carsismo

Questo tema tende ad evidenziare le correlazioni tra gli andamenti climatici e le variazioni nel reticolo idrografico anche nella sua circolazione sotterranea. Tra gli obiettivi figura l'individuazione delle geometrie sepolte di forme carsiche particolari (doline).

Considerata: i) la diffusione di rocce carsificabili in Italia ed il notevole sviluppo di morfologie carsiche sia epigee che ipogee (valutabile intorno al 18% del territorio nazionale); ii) il basso rapporto (0.41%) tra il numero di cavità individuate ed esplorate e gli affioramenti carsici; iii) le evidenti connessioni tra carsismo ed acque sotterranee; facilmente si comprende l'impulso verso l'uso di forme di indagine indirette fornite dai metodi geofisici (soprattutto geoelettrici, gravimetrici e sismici) nella prospezione delle cavità sotterranee. In tale fenomenologia le doline costituiscono forme molto comuni ma con strutture complicate dalla concomitanza di processi morfogenetici e fattori condizionanti come quelli litologici, tettonici, climatici, ecc.

Per una valutazione dei principali parametri geofisici di queste forme carsiche epigee sono state condotte alcune indagini sperimentali (Leale, 1993) su quattro doline campione, appartenenti a tre aree carsiche differenti: l'area del Bric Tana (Millesimo, Savona), quella dell'altopiano delle Manie (Savona), poste sul versante tirrenico delle Alpi Liguri e l'area carsica di Roburent (Cuneo) posta sul versante padano. Su ogni dolina sono state condotte, seguendo uno schema operativo comune sia nella fase di acquisizione dei dati che nella fase della loro elaborazione ed interpretazione, indagini elettromagnetiche (VLF), magnetiche, geoelettriche e sismiche a rifrazione.

La tecnica VLF si è dimostrata particolarmente sensibile (Fig. 4) al contrasto laterale di conducibilità elettrica costituito dalle variazioni di spessore del riempimento conduttivo della dolina.

Il metodo magnetometrico rivela che i dati acquisiti risultano significativi quando, come verificato su tre delle quattro doline esaminate, il valore della suscettività magnetica del materiale di riempimento è almeno di due ordini di grandezza superiore a quello delle rocce costituenti il substrato.

La prospezione geoelettrica si è dimostrata la più risolutiva ai fini di determinare la morfologia e la condizione del substrato e la stima degli spessori della copertura.

L'interpretazione dei dati sismici è risultata non priva di problemi a causa del modello interpretativo adottato, che comporta una schematizzazione della morfologia del rifrattore ad un orizzonte piano che si discosta in modo eccessivo dalla sua realtà fisica.

L'analisi comparata dei risultati forniti dai diversi metodi ha permesso di determinare i parametri più salienti delle doline esaminate, quali ad esempio, la situazione geologico-strutturale sulla quale si è imposta la forma, la tendenza evolutiva, le caratteristiche geometriche (spessori) e fisiche (elettriche, magnetiche) del riempimento.

1.4 Geofisica e possibilità tecnologiche di riduzione dei problemi ambientali

Tema: *Smaltimento dei rifiuti*

Nell'ambito dei sistemi di gestione dei rifiuti si rilevano numerosi problemi nella fase di trattamento e smaltimento. Tra gli aspetti tecnici più rilevanti figurano la caratterizzazione geologico-geofisica preliminare del sito ospitante, la caratterizzazione geotecnica dei rifiuti, i sistemi di analisi e monitoraggio del percolato, la localizzazione di discariche abusive, il risanamento di siti inquinati.

La prospezione geofisica si è dimostrata un valido strumento di localizzazione e identificazione di contaminanti organici ed inorganici nel terreno e di rifiuti solidi interrati. A questo proposito è significativo il caso di una discarica di materiali tossici infustati in contenitori metallici abusivamente interrati in una cava della Liguria Occidentale (Bozzo *et al.*, 1993c).

L'indagine geofisica volta a determinare le possibilità di confinamento e recupero del materiale occultato e gli effetti di un possibile impatto ambientale procurato dai reflui fuoriusciti dai fusti, ha fatto uso di tecniche magnetometriche PPM ed elettromagnetiche VLF.

I principali risultati ottenuti possono essere così sinteticamente riassunti:

- la "marcatatura" magnetica non è limitata ai contenitori metallici ma si manifesta anche in alcune sostanze in essi contenute (Fig. 5);
- non tutti i materiali infustati hanno caratteristiche magnetiche e/o elettromagnetiche rilevabili anche a causa del loro avanzato stato di alterazione;
- le misure elettromagnetiche indicano una direzione di scorrimento delle acque sotterranee provenienti da un torrente, divergente rispetto alla posizione del corpo di discarica;
- la valutazione volumetrica della discarica di fusti è complicata dalla insufficiente disponibilità di spazio per l'estensione delle misurazioni geofisiche. I volumi stimati vanno considerati come "volumi equivalenti" su base geofisica, che può approssimare una struttura reale solo se tutto il materiale che la costituisce può essere evidenziato con le tecniche adottate;
- l'indagine ha confermato che solo uno dei due piazzali di cava (quello in posizione più elevata) è interessato dall'opera di interrimento abusiva di rifiuti.

2. GEOFISICA APPLICATA ALL'ARCHEOLOGIA

Anche in questo settore il Gruppo di Geofisica Applicata del DISTER è stato particolarmente impegnato negli ultimi anni (Bozzo *et al.*, 1989; 1990; 1992a). Tale attività è stata anche supportata dal CNR con un sottoprogetto specifico di Geofisica Applicata ai Beni

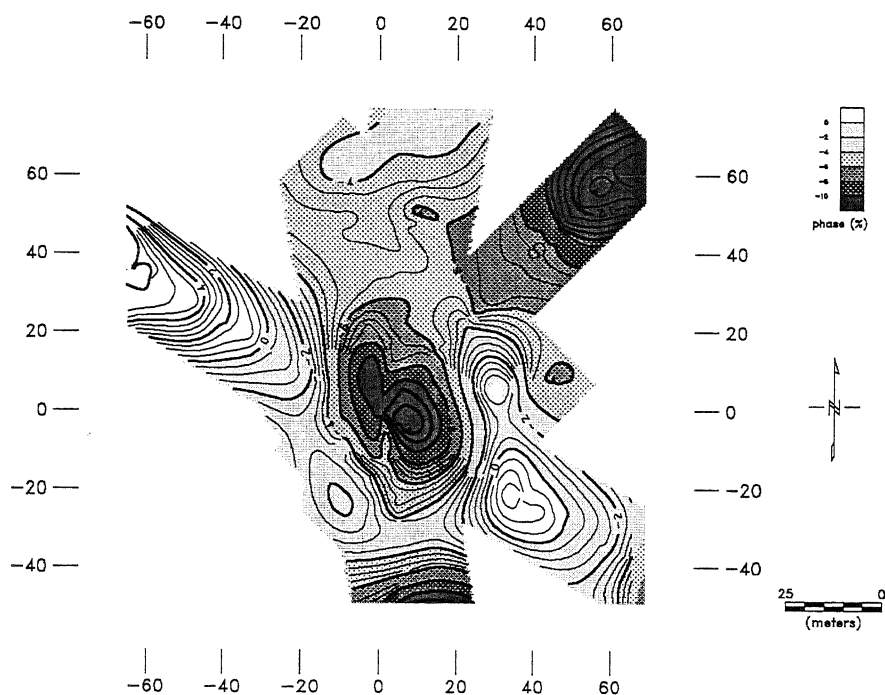


Fig. 4 - Millesimo (Savona). Località Bric Tana. Esempio di prospezione geofisica in ambiente carsico. La rappresentazione della componente in fase (%) nelle misure VLF identifica chiaramente la posizione degli accumuli maggiori di materiali residuali. Nel caso in esame, in base alla direzione di misura e alla trasmittente usata l'aumento di spessore di tali accumuli è stato correlato ai valori negativi del parametro misurato.

Millesimo (Savona province, Liguria, NW Italy). Bric Tana site. Geophysical prospecting in a karst environment. The VLF percent phase component graph clearly shows the position of the largest accumulations of residual materials. In the studied case, the increase in thickness of accumulations is correlated with the measured parameter negative values on the basis of measurement direction and of used transmitter.

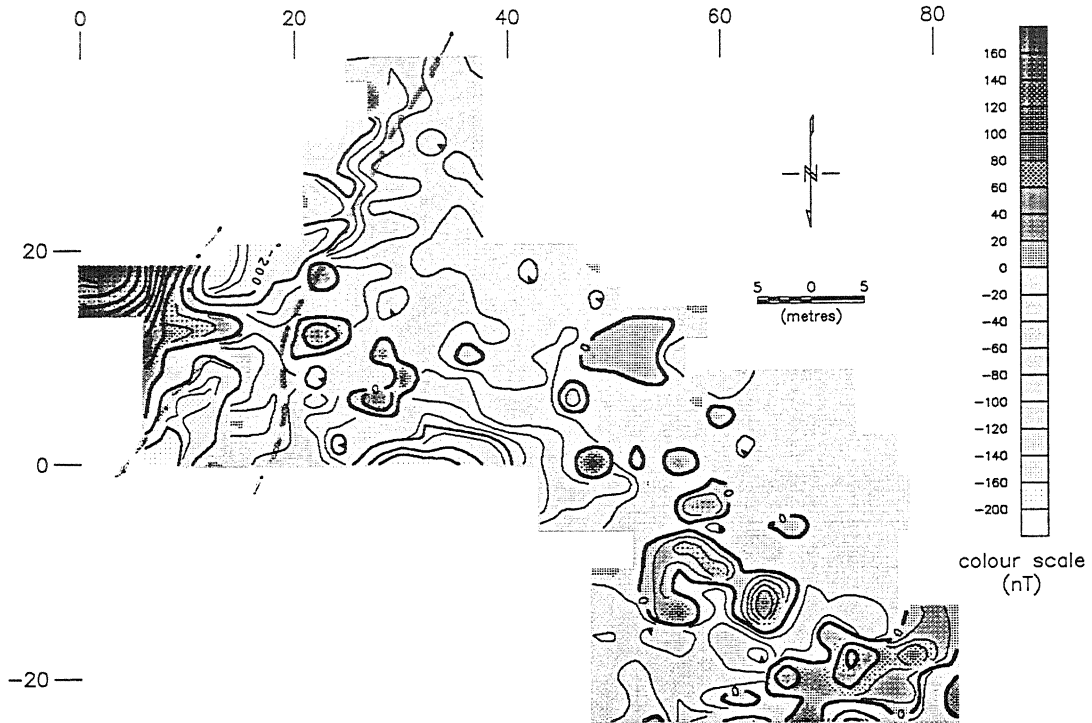


Fig. 5 - Liguria Occidentale. Esempio di prospezione geofisica in un sito di discarica abusiva. Mapa della distribuzione del gradiente magnetico (PPM). L'ammasso principale dei fusti interrati è posto nel settore E-SE (a sinistra in alto, nella figura), il corridoio di anomalie negative, compreso tra le due linee a tratteggio, suggerisce la delimitazione verso NO dell'ammasso. Le anomalie di minore lunghezza d'onda corrispondono a rottami non direttamente collegati al deposito abusivo di rifiuti tossici.

Western Liguria. Geophysical prospecting of a site of unauthorized waste discharge. Chart of magnetic gradient (PPM) distribution. The largest portion of buried cans is located in the E-SE sector (top left in the figure); the band of negative anomalies between dashed lines, suggests that the discharge profile terminates northwestwards. The anomalies of shorter wave length can be attributed to wastes which are not related to the unauthorized toxic waste discharge.

Culturali inserito nel più ampio contesto del Progetto Strategico delle Tecnologie moderne per la conservazione dei Beni Culturali. Obiettivi privilegiati sono stati individuati nelle aree archeologiche di Sibari e Selinunte (Bozzo & Merlanti, 1992; Bozzo *et al.*, 1992a),

Le motivazioni di base allo sviluppo di questi studi interdisciplinari sono state efficacemente sintetizzate da Gullini (1990) "Contributi conoscitivi che consentono di chiarire natura, provenienza, caratteristiche fisiche di un reperto o di preesistenze fisiche ed antropiche del territorio indagato sono parte della ricerca storica con cui si valuta la qualità dell'indagine archeologica. Da qui, l'integrazione di diversi apporti disciplinari è indispensabile alla completa interpretazione del manufatto o delle trasformazioni apportate dall'uomo all'ambiente. Se il terreno è il contenitore di tutte le preesistenze fisiche ed antropiche su cui si fonda la ricerca archeologica per la ricostruzione più completa possibile di presenze umane nel passato, la conoscenza sistematica ed approfondita di esso è essenziale, indipendentemente dall'indagine di scavo, necessariamente lunga ed impegnativa e quindi assai circoscritta. Da tempo in questo ambito, i metodi della geofisica sono venuti incontro alla ricerca archeologica: essi sono stati però applicati per abbreviare i tempi, spesso troppo lunghi, occorrenti per lo sfruttamento, più o meno fortunato, del terreno come fonte di ritrovamenti da apprezzare per il loro pregio intrinseco o formale, più che come documenti fondamentali per una ricostruzione storica". Il nuovo approccio della geofisica in questo campo di applicazione può consentire di superare quello che è finora uno dei maggiori limiti dell'archeologia, la mancanza di sistematicità nell'individuazione e nell'acquisizione delle informazioni.

Applicazioni di questo tipo che hanno visto l'integrazione delle tecniche archeologiche con quelle della prospezione geofisica (magnetica, geoelettrica, elettromagnetica e sismica) sono state proficuamente utilizzate dagli Autori in diversi contesti archeologici in Italia ed all'estero. Oltre al sopramenzionato programma nazionale di Sibari-Selinunte, essi si limitano a citare altri interventi come quello al villaggio abbandonato di età medievale di M. Zignago (Bozzo, 1990), al porto romano di Luni (Bozzo & Merlanti, 1986), statue-steli nell'Appennino ligure ed in Lunigiana (Bozzo *et al.*, 1989), alla necropoli celtica di M. Bibebe a Monterenzio (Bozzo *et al.*, 1990), alla città etrusca di Marzabotto (Bozzo *et al.*, 1992b), in Italia, e quello all'insediamento dell'età del Bronzo a Poliochni nell'isola di Lemnos (Bozzo *et al.*, 1992a), in Grecia. Di questi, il programma Marzabotto ha rappresentato, per la continuità delle indagini, sviluppatate nell'arco di un triennio, e le sinergie prodotte dalle diverse aree culturali, l'esempio migliore. In questo insediamento etrusco le indagini geofisiche sono state indirizzate alla localizzazione di strutture urbane organizzate. Per le indagini geoelettriche degli strati più superficiali (Fig. 6), sono stati utilizzati dispositivi non standard (tripotenale e *square array*), mentre da una serie di SEV in assetto *Offset Wenner* è stata ottenuta una stratigrafia elettrica verticale. L'articolazione dell'indagine geoelettrica ha condotto alla produzione di alcune pseudosezioni, ottenute sulla base di tecniche di profilaggio con configurazioni doppio dipolo e *Wenner*. La tecnica elettro-

magnetica VLF ha confermato la scarsa attitudine di questo metodo nell'identificazione di strutture che, in relazione ai materiali circostanti, presentano piccoli contrasti nei parametri elettrici e più in generale in mezzi che presentano caratteristiche di elevata conducibilità. I migliori risultati della tecnica VLF sono stati forniti dalla morfologia del livello conglomeratico collocato alla base del terrazzo alluvionale su cui sorge Marzabotto. Le misure magnetiche sono state ottenute con assetto gradiometrico. In relazione alle proprietà dei materiali lapidei utilizzati nell'insediamento, queste misure hanno fornito informazioni sulla presenza di "aree bruciate" e di materiali cotti utilizzati negli arredi urbani e negli attrezzi domestici. Per quanto riguarda la possibile localizzazione di forni, la prospezione ha indicato, nell'area investigata, la prevalenza delle installazioni domestiche, mentre non si sono trovate anomalie magnetiche correlabili a strutture industriali. Questo lavoro è stato parzialmente dedicato allo studio del più favorevole rapporto fra dimensione dei dispositivi di misura, griglia di prospezione e minima dimensione delle strutture del sottosuolo.

Alcune delle anomalie più significative, osservate con tecniche diverse, sono state verificate direttamente mediante scavi, quindi è stata controllata e discussa la significatività fisica delle anomalie.

3. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

I metodi geofisici rappresentano uno strumento significativo per la rilevazione, in forma non distruttiva, di strutture naturali e antropiche sepolte e che può fornire un *input* fondamentale per la progettazione degli interventi. Nello stesso modo situazioni potenzialmente (o effettivamente) pericolose possono essere individuate e controllate in termini di estensione, significatività ed evoluzione nel tempo.

La selezione del metodo più adatto, o la combinazione di metodi, deve essere individuata sulla base delle informazioni disponibili e degli obiettivi posti alla ricerca. I risultati ottenuti possono indurre considerevoli benefici in termini di localizzazione di *targets* archeologici e fonti di pericolosità ambientale, suggerire schemi operativi idonei e l'applicazione di efficienti misure di intervento e bonifica.

In conclusione i metodi geofisici quando correttamente applicati possono contribuire notevolmente alla razionale progettazione di interventi nei settori dei beni ambientali e culturali.

I risultati riportati in questo lavoro sono stati esposti nella forma di *case history*. L'obbligo di sintetizzare in uno spazio necessariamente ridotto le attività sviluppate a sostegno degli obiettivi raggiunti, in aree culturalmente diverse, non ha favorito la completezza dell'esposizione e conseguentemente limita la comprensione dei diversi argomenti. Tuttavia la maggior parte delle ricerche presentate fanno riferimento a lavori specifici e completi riportati in bibliografia.

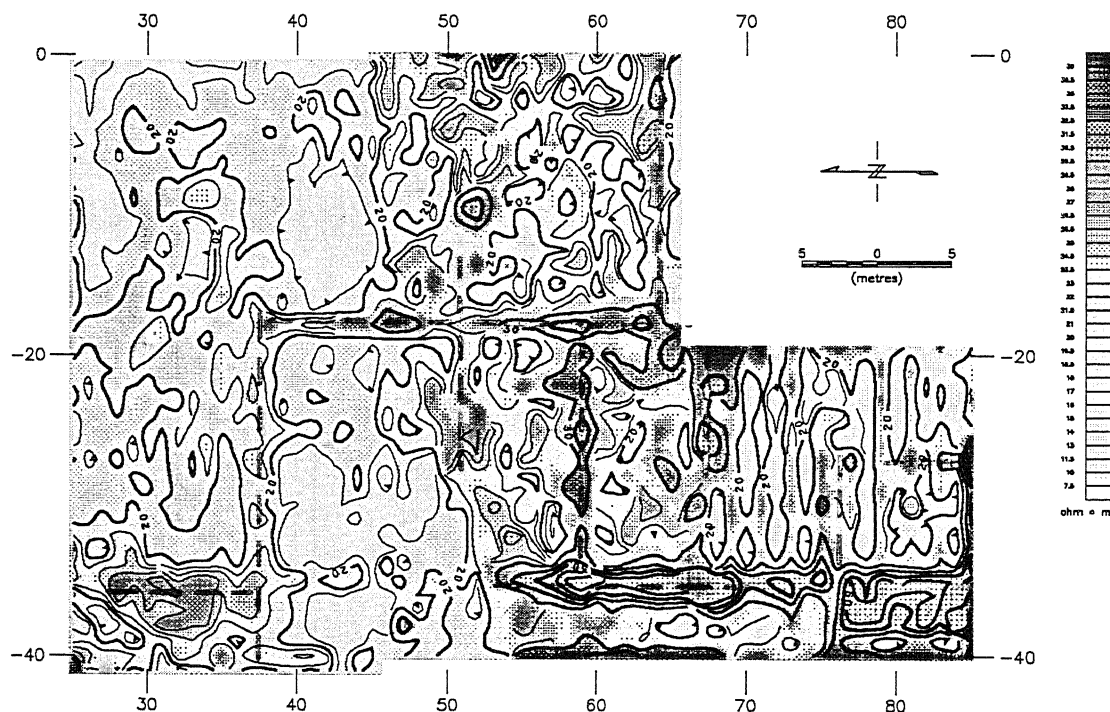


Fig. 6 - Marzabotto, Bologna. Esempio di prospezione geofisica a scopo archeologico. Mappa della distribuzione verticale della resistività apparente ($\text{ohm} \cdot \text{m}$) in una porzione dell'isola 2, settore IV, dell'insediamento etrusco di Marzabotto. Le anomalie lineari (contrassegnate in figura con linee a tratteggio) corrispondono a resti di fondazioni. Sono altresì individuati resti di pavimentazione e imboccature di pozzi d'acqua.

Marzabotto, Bologna. Geophysical prospecting applied to archeological studies. Chart of the vertical distribution of apparent resistivity ($\text{ohm} \cdot \text{m}$) in a portion of island 2, IV sector, of the Etruscan settlement at Marzabotto. Linear anomalies (dashed lines) are due to remnants of foundations. Also pavement relics and water well mouths are clearly identifiable.

RINGRAZIAMENTI

Siamo grati a quanti hanno partecipato, alle misure di campagna ed all'elaborazione dei dati ed in particolare ai: Dott. Marco Gambetta, Dott.ssa Silvia Lombardo, Dott. Mauro Pavan e Sig. Giorgio Caneva.

BIBLIOGRAFIA

- Bozzo E., 1990 - *Indagine magnetometrica al villaggio abbandonato di Monte Zignago*. Archeologia Medievale, **XVII**, 1990, 411-418.
- Bozzo E., Coltelli M., Lombardo S., Merlanti F. & Tabacco I., 1993a - *A geoelectromagnetic survey on a lava tube of the 1991-1993 Etna eruption*. Acta Vulcanologica, Special Issue on the 1991-93 Etna eruption (in stampa).
- Bozzo E., Gambetta M., Lombardo S. & Merlanti F., 1993b - *Geophysical techniques for environmental audit*. Symp. Int. Géologie et Confinement des Déchetes Toxiques, Geoconfine '93, Montpellier, **1**, 377-382.
- Bozzo E., Lombardo S. & Merlanti F., 1993c, *Geophysical prospecting for aquifers in fractured areas near Bonassola (Eastern Liguria)*. Atti XI Convegno G.N.G.T.S., Roma 9-11 Dic. 1992, 697-710.
- Bozzo E., Lombardo S., Merlanti F. & Pavan M., 1992a - *Misure geoelettriche ed elettromagnetiche in un contesto archeologico organizzato: l'esempio di Marzabotto*. 4° Workshop Naz. di Geoelettromagnetismo, Capri 16-18 Sett. 1992, Ann. di Geofis. (in stampa).
- Bozzo E. & Merlanti F., 1986 - *Misure geofisiche nell'area archeologica di Luni (La Spezia)*. Atti V Conv. G.N.G.T.S., Roma, 17-19 Nov. 1986, 1039-1048.
- Bozzo E. & Merlanti F., 1992 - *Magnetic and geoelectrical measurements on the eastern hill of the archaeological site of Selinunte*. Boll. Geofis. Teor. Appl., **XXXIV**, 134/135, 145-156.
- Bozzo E., Merlanti F., Lombardo S., Giomi F., Traversone B., Caneva G., 1992b - *Indagini geofisiche a Poliochni, Lemnos (Egeo Settentrionale)*. Atti Scuola It. di Archeologia di Atene (in stampa).
- Bozzo E., Merlanti F. & Postpischl D., 1990 - *Magnetometric investigations of the Mt. Bibeles Celtic necropolis, Monterzio, Italy*. Archeometry '90, 697-707.
- Bozzo E., Merlanti F. & Saperdi E., 1989 - *Indagini geofisiche in alcuni siti archeologici dell'Appennino ligure e della Lunigiana*. Atti Convegno di Geofisica per l'Archeologia, Porano (Tr), 21-23 Sett. 1988, CNR, Quaderni ITABC, Roma, 1/90, 117-133.
- Bozzo E., Merlanti F., Ranieri G., Sambuelli L. & Finzi E., 1992 - *EM-VLF soundings on the eastern hill of the archaeological site of Selinunte*. Boll. Geofis. Teor. Appl., **XXXIV**, 134/135, 169-180.
- Delsante C., 1992 - *Applicazioni del metodo sismico ad ultrasuoni in campo geognostico e strutturale*. Tesi di Laurea, Università di Genova, 256 pp.
- Gullini G., 1990 - *Le domande dell'Archeologia*. Atti Seminario Geofisica per l'Archeologia, CNR, Quaderni ITABC, Roma, 1/90, 1-9.
- Leale E., 1993 - *Indagini geofisiche applicate a forme carsiche epigee: le doline*. Tesi di Laurea, Università di Genova, 198 pp.

Manoscritto ricevuto il 20. 7. 1993
 Inviato all'Autore per la revisione il 9. 3. 1994
 Testo definitivo ricevuto il 26. 4. 1994