

Lezioni di Geofisica Applicata per l'Archeologia

Prof. Giovanni Santarato.

Introduzione

Molte situazioni e necessità dell'economia, della società e della salute incontrano il problema di "vedere" oltre la superficie: del corpo umano, del sottosuolo, di manufatti quali murature ed altri elementi architettonici od artistici. Ciò è dovuto al fatto di per sé banale ma importante che, salvo poche eccezioni (l'acqua, il vetro...), la materia non è trasparente nel senso comune del termine, cioè non lascia passare la luce visibile al di là della superficie dei corpi. Il nostro "vedere" infatti consiste nel ricevere la luce visibile riflessa dalle superfici che ci circondano e nel trasformarlo nelle forme degli oggetti nonché nei rispettivi colori. Quest'ultima capacità è tipica della specie umana ed è dovuta alla sensibilità della retina alle diverse lunghezze d'onda della luce visibile, ciascuna delle quali viene tradotta in un "colore". La luce visibile infatti è costituita da onde elettromagnetiche, che viaggiano ad altissima velocità sia nel vuoto che nei mezzi materiali trasparenti citati. Queste onde "visibili" hanno lunghezza d'onda compresa tra circa 0.4 e 0.7 μm nel vuoto. In questo mezzo la velocità della luce, c , è come noto di circa 300.000 km/s o, meglio, utilizzando il sistema internazionale di unità di misura (MKS: metro, chilogrammo, secondo), $3 \cdot 10^8$ m/s¹. Pertanto la frequenza della luce visibile è compresa tra $(3 \cdot 10^8 / 0.7 \cdot 10^{-6})$ e $(3 \cdot 10^8 / 0.4 \cdot 10^{-6})$ Hz, cioè tra circa $4.2 \cdot 10^{14}$ e $7.5 \cdot 10^{14}$ Hz.

Per vedere all'interno dei corpi dunque, salvo le poche eccezioni già citate, la luce visibile non serve. Occorre perciò ricorrere ad altri metodi. Sia la scienza medica da un lato, per vedere all'interno del corpo umano e dei suoi organi a fini terapeutici, che la "Geofisica" dall'altro, per vedere nel sottosuolo, inizialmente alla ricerca delle georisorse, hanno messo a punto, ciascuna nel suo campo, vari procedimenti per raggiungere lo scopo. Questi procedimenti hanno molti punti di contatto e le conseguenti visualizzazioni (immagini) che otteniamo si somigliano in proporzione. Un efficace esempio di metodiche "simili" è quello che nella diagnostica medica è chiamato ecografia: essa si basa sull'invio di un fascio di impulsi acustici (sono brevi treni d'onda ad andamento sinusoidale) ad altissima frequenza (1 MHz o più) e sulla ricezione delle onde riflesse. L'immagine a tutti nota che si ottiene è un'opportuna (e finemente elaborata) rappresentazione grafica degli impulsi riflessi. Riflessi dove? Alle superfici di discontinuità dei singoli organi, che dunque vengono "visti" nella loro forma, oppure alle discontinuità che si creano all'interno dei singoli organi per cause patologiche (es. nuclei neoplasici), che possono essere dunque localizzate e la loro dimensione misurata (diagnosi). Riflessi perché? Perché ai diversi organi od alle loro modificazioni patologiche interne corrispondono velocità diverse delle onde acustiche. Vedremo meglio in seguito le leggi che governano la propagazione delle onde meccaniche (o elastiche, o acustiche, o sismiche quando si propagano nel sottosuolo) e delle onde elettromagnetiche. In Geofisica, il metodo corrispondente all'ecografia è la cosiddetta "sismica a riflessione" nella quale, inviando nel sottosuolo un impulso elastico sufficientemente potente (da una semplice martellata con una mazza da cantiere all'esplosione di un nutrito numero di kg di dinamite), con le onde riflesse alle varie discontinuità si ricostruisce la distribuzione delle varie formazioni geologiche.

¹ In qualunque fenomeno ondulatorio la lunghezza d'onda, λ , si definisce come la distanza tra due massimi (o minimi), cioè ad es. come la distanza tra due creste consecutive di un moto ondoso alla superficie del mare. Si definisce anche la frequenza, f , come il numero di oscillazioni che il moto ondoso compie in un secondo; la sua unità di misura è il ciclo/secondo o Hertz (Hz). Il periodo dell'onda, T , è infine il tempo che l'onda impiega per percorrere una distanza pari ad una lunghezza d'onda. Valgono dunque le seguenti relazioni: $T=1/f$; $\lambda/T=\lambda f=c$.

Con questo metodo si trovano ad es. le strutture potenzialmente sature di idrocarburi (il petrolio od il metano).

Un secondo esempio, per tacere poi di numerosi altri, è la ben nota “TAC”, cioè la Tomografia Assiale Computerizzata. In questa tecnica, un fascio rotante di raggi X^2 penetra nel corpo umano e viene assorbito diversamente dai vari organi attraversati. Un potente algoritmo di calcolo (ecco perché tomografia “computerizzata”) ricostruisce la posizione, nella sezione investigata, dei vari organi in funzione del rispettivo coefficiente di assorbimento della radiazione X e ne risulta l’immagine che tutti conosciamo.

In Geofisica un’analogia tecnica di ricostruzione tomografica viene applicata usando principalmente:

1. onde acustiche o, più propriamente, elastiche (tomografia acustica o sismica),
2. onde elettromagnetiche a frequenze relativamente basse (tra 10^8 e 10^9 Hz: tomografia radar),
3. correnti elettriche continue (tomografia della resistività elettrica).

Per venire a noi, visualizzare l’interno dei corpi significa soprattutto:

1. individuare e possibilmente definire la geometria di strutture archeologiche sepolte (fondazioni, tombe...) nel vicino sottosuolo,
2. individuare i paleosuoli, ovvero le superfici antropizzate nelle epoche passate.

L’indagine geofisica dunque si presenta come un insieme di metodi e tecniche volti a rilevare la struttura del sottosuolo o dei corpi investigati mediante sole ed opportune misure alla superficie degli stessi, con minima o nulla invasività. I metodi geofisici vengono anche detti metodi non invasivi (o minimamente invasivi) o metodi indiretti per distinguerli dai metodi d’indagine diretta, realizzati mediante perforazioni e sondaggi meccanici.

Fare delle misure di opportune specifiche grandezze in superficie significa, in via del tutto generale, che si va a cercare una risposta degli oggetti interni o sepolti che risulti misurabile in superficie. Questa risposta verrà solo in un secondo tempo, ed al costo di elaborazioni matematiche a volte pesanti, restituita sotto forma di “immagine” dell’interno dei corpi investigati. Si tratta dunque di un’accezione non ovvia dei termini “vedere” e “immagine” che, come vedremo nei singoli metodi, spesso non ha nulla da spartire con gli analoghi termini del senso comune e della vita di tutti i giorni. In qualche metodo l’indagine può venire arrestata alla mappatura della grandezza fisica misurata, qualora sia considerata già sufficiente per gli scopi successivi.

L’indagine geofisica dunque procede per passaggi successivi:

1. progettazione della campagna di misure: in questa fase si sceglie il metodo o la combinazione di metodi che sembrano più opportuni, in funzione delle caratteristiche fisiche dell’obiettivo da rilevare. Viene scelta altresì la strategia di acquisizione dei dati, anche tenendo conto dei costi;
2. esecuzione delle misure sul campo. Questa fase deve essere accompagnata da un rilievo topografico, in modo da georeferenziare con la precisione sufficiente sia le misure stesse che, conseguentemente, gli oggetti sepolti che usciranno dal passo successivo;
3. elaborazione dei dati raccolti, sia per la presentazione degli stessi che soprattutto per la ricostruzione della geometria dell’interno dei corpi investigati, mediante un processo matematico di inversione.

Oggetto del presente insegnamento sarà dunque un “excursus” ragionato delle basi fisiche dei principali metodi d’indagine, che la geofisica mette a disposizione per le applicazioni al patrimonio culturale. Questo excursus verrà illustrato da vari esempi tratti dalla personale esperienza dello scrivente e dalla letteratura. Il suo scopo principale è mettere il futuro Laureato in materie archeologiche in grado di “leggere” i prodotti delle indagini eseguite dai tecnici specializzati ed eventualmente collaborare, con cognizione di causa, nella loro progettazione e raccolta.

Nelle indagini geofisiche per l’archeologia, le principali caratteristiche o proprietà fisiche che vengono prese in considerazione sono le seguenti:

² sono onde elettromagnetiche del tutto simili alla luce visibile, salvo che per la frequenza, ancora più alta: per questa proprietà hanno un potere di penetrazione nei corpi piuttosto alto, a differenza della luce visibile.

1. la suscettività magnetica,
2. la resistività elettrica,
3. la permittività o costante dielettrica,
4. la velocità delle onde acustiche od elastiche.

Esistono altre proprietà fisiche della materia, che però non vengono prese in considerazione in quest'ambito applicativo; tra queste, le più importanti sono la densità e la conducibilità termica. La prima non viene utilizzata perché nella geofisica applicata generale la sua distribuzione nel sottosuolo viene stimata da misure altamente precise delle anomalie del campo gravitazionale terrestre. Queste misure sono così delicate e difficili che solo corpi di dimensioni ben maggiori di quelle dei costruiti archeologici (fondazioni, tombe) possono dare un'anomalia gravitazionale misurabile con l'attuale strumentazione. La seconda è utilizzata nelle indagini non invasive per i beni culturali, mediante l'uso di foto- o tele-camere sensibili all'infrarosso³, ma le informazioni che se ne desumono si riducono alla presenza di umidità nei primissimi cm sotto la superficie.

La distribuzione di ciascuna delle quattro proprietà fisiche summenzionate viene ricostruita utilizzando metodi di misura e di elaborazione diversi, che sono rispettivamente:

1. il metodo magnetometrico: esso si basa sul rilievo di dettaglio delle anomalie del campo magnetico terrestre, dovute a corpi a suscettività magnetica anomala;
2. il metodo geoelettrico: esso si basa sul rilievo del campo elettrico associato ad un flusso di corrente elettrica, opportunamente iniettata nel corpo investigato; il campo elettrico osservato dipende dalla distribuzione della resistività elettrica all'interno dello stesso corpo; la distribuzione della resistività elettrica può essere inferita anche utilizzando come sorgente di segnale campi magnetici variabili nel tempo: si osserveranno campi magnetici indotti dipendenti dalla sua distribuzione (metodo elettromagnetico);
3. la trasmissione-ricezione di impulsi elettromagnetici ad alta frequenza (10^8 - 10^9 Hz), utilizzando il ben noto geo-radar; la variazione della costante dielettrica da corpo a corpo dà luogo a variazioni di velocità e quindi a riflessioni di tali onde sulle superfici di discontinuità;
4. la trasmissione-ricezione di impulsi acustici od elastici; la variazione delle proprietà elastiche da corpo a corpo dà luogo a variazioni di velocità e quindi a riflessioni di tali onde sulle superfici di discontinuità, come nel metodo precedente.

³ La Fisica insegna che tutti i corpi a bassa temperatura emettono onde elettromagnetiche a frequenze inferiori a quelle della luce visibile, per questo dette infrarosse, perché la frequenza visibile più bassa è per l'appunto quella che dà la luce rossa.