

# Applicazione di indagini geofisiche: il sottosuolo e la sua contaminazione

Sara Angela Cantarella<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tecnologie per l'ambiente

## **Abstract**

Il piano di caratterizzazione costituisce uno dei primi momenti di un progetto di bonifica. Nell'ambito della caratterizzazione, si riconosce una fase di particolare rilevanza che è quella della definizione e successiva esecuzione del piano di indagini. In tale contesto, le indagini geofisiche sembrano assumere un'importanza crescente attribuibile alla loro applicazione rapida e non invasiva del suolo e alle molteplici informazioni che consentono di ottenere, tuttavia esse presentano delle limitazioni in termini di quantificazione della concentrazione di contaminante e di sensibilità delle grandezze misurate che possono quindi condurre facilmente a deduzioni errate. Per questo motivo le applicazioni più comuni prevedono una combinazione di tali metodi geofisici con indagini dirette al fine di ridurre al minimo gli errori. Nell'elaborato che segue si fornisce una descrizione generale delle indagini geofisiche e delle loro applicazioni a livello nazionale ed internazionale, approfondendo poi nello specifico l'applicazione di metodi geoelettrici nell'ambito del piano di caratterizzazione di una discarica.

## **Le indagini geofisiche: caratteristiche e diffusione globale**

La bonifica dei siti contaminati è una procedura complessa articolata in più fasi atte a ricostruire, in maniera organizzata e dettagliata, il percorso che conduce alla identificazione della più idonea tipologia di intervento da realizzare sul sito di riferimento. All'interno di questa moltitudine di fasi vi è, tra le altre, quella che prevede la costruzione ed esecuzione del piano di indagini. Il piano di indagini, inserito nel più ampio contesto del piano di caratterizzazione, è definito dal D. Lgs. 152/2006, riferimento normativo italiano in materia d'ambiente. In particolare, ai sensi dell'allegato 2 al Titolo V, parte IV del suddetto decreto, il piano di caratterizzazione è definito come "l'insieme delle attività che permettono di ricostruire i fenomeni di contaminazione a carico delle matrici ambientali" e sarà poi all'interno del

piano di indagini che si andranno a delineare e descrivere le attività da svolgere in campo e in laboratorio per la caratterizzazione ambientale del sito. Le indagini, secondo quanto previsto dalla normativa, possono essere di tipo diretto e di tipo indiretto, ed è su queste ultime che ci si concentrerà in questo elaborato. Le indagini indirette, ovvero indagini geofisiche, si basano sulle regole e le leggi della fisica e misurano la variazione di determinate proprietà fisiche dei terreni da cui poter elaborare dei modelli del sottosuolo <sup>1</sup>. Tali indagini trovano largo impiego nelle più svariate applicazioni in quanto consentono di ottenere uno screening totale del sottosuolo che può essere utilizzato come base di partenza per studi e analisi future, sia dal punto di vista della bonifica, che per quanto riguarda la caratterizzazione di eventi franosi <sup>2</sup> e studi archeologici, inoltre possono essere applicate per il monitoraggio dei parametri del suolo e dell'idrologia in zone urbane dove il campionamento diretto e distruttivo non è sempre possibile <sup>3</sup>. In particolare, nel contesto della bonifica dei siti contaminati, la geofisica ambientale si pone l'obiettivo di individuare eventuali focolai di contaminazione riuscendo ad ampliare l'orizzonte dell'investigazione rispetto a quello limitato e puntuale delle indagini dirette.



Figure 1: Esempi strumentazione per indagini indirette

I metodi di indagine indiretta sono molteplici e la scelta di uno o più di questi metodi non può prescindere dalle caratteristiche geologiche e idrogeologiche del sito e, chiaramente, dal risultato che ci si prefigge di raggiungere. I vantaggi apportati dall'utilizzo di questi metodi sono numerosi, essi infatti forniscono una valutazione rapida <sup>4</sup> e a minor costo rispetto i metodi diretti, prevedono metodologie di indagini e strumentazione (Figura 1) tali da rendere la valutazione non invasiva, consentono l'ottenimento di una caratterizzazione spaziale e tridimensionale del sottosuolo e del fenomeno di contaminazione, consentono di ridurre al minimo il numero di analisi da effettuare soprattutto se eseguiti preliminarmente alle indagini dirette in quanto consentono di individuare i punti specifici per i successivi campionamenti; tuttavia essi presentano importanti svantaggi legati in par-

te all'impossibilità di ottenere una stima quantitativa delle concentrazioni di contaminante e in parte alle difficoltà di applicabilità dei singoli metodi che è possibile riscontrare caso per caso a seconda delle caratteristiche del sottosuolo e del contaminante da rilevare. Per questo motivo l'iter applicativo prevede, nella maggior parte dei casi, una combinazione di più metodi geofisici e di questi ultimi con indagini dirette. In tal senso, nello studio di <sup>5</sup> sono stati utilizzati metodi geoelettrici e GPR per definire la distribuzione di pennacchi di contaminazione in un sito di smaltimento di idrocarburi abbandonato. In particolare, le variazioni di resistività derivanti dalle indagini geoelettriche hanno consentito di ottenere risultati più dettagliati che hanno permesso di delineare le aree contaminate e di individuare i punti per il successivo campionamento del suolo. Un altro esempio di applicazione di indagini geofisiche lo ritroviamo nello studio condotto da <sup>6</sup>, nel quale le tomografie elettriche sono state utilizzate per valutare l'evoluzione di sedimenti contenenti un gran numero di bolle di metano durante un processo di bonifica. Tali metodi infatti si rivelano particolarmente adatti a tale scopo in quanto è stato dimostrato che la resistività dei sedimenti contenenti gas aumenta notevolmente rispetto a quella dei sedimenti senza gas <sup>7,8</sup>. Preliminarmente alla bonifica sono stati applicati metodi sismici per individuare l'area in oggetto e al termine della stessa sono state effettuate le tomografie elettriche. Il confronto dei risultati geofisici ha consentito di valutare le variazioni orizzontali e verticali del sedimento contenente bolle di metano. Le indagini indirette hanno, poi, trovato impiego, in alcuni casi, quali azioni di monitoraggio. Questo è il caso dello studio di <sup>9</sup> in cui in particolare sono state sperimentate la polarizzazione spettrale indotta e la misurazione della velocità delle onde di taglio come metodi di monitoraggio durante un processo di stabilizzazione del suolo mediante precipitazione microbica di carbonato (MICP); così come <sup>10</sup> che all'interno del loro studio hanno monitorato, in un arco di 22 anni, l'evoluzione del pennacchio di contaminazione in un deposito di rifiuti dismesso, nonché i processi di trasporto e attenuazione dei contaminanti, attraverso indagini geoelettriche e indagini dirette. I valori costanti in termini di resistività misurati nonché le elevate concentrazioni di metalli rilevate attraverso campioni effettuati fino a 200 m di distanza dal deposito, hanno dimostrato che l'attenuazione naturale non è in grado di riabilitare i siti vicini alla zona di smaltimento dei rifiuti. Va detto che nell'ambito della bonifica dei siti contaminati, sicuramente un ruolo importante va attribuito alle numerose discariche incontrollate distribuite in tutto il mondo che secondo quanto riportato da <sup>11</sup> sono tra le principali cause di contaminazione delle acque sotterranee e del sottosuolo. <sup>4</sup> ad esempio, nel loro studio hanno proposto una combinazione di prospezione elettromagnetica nel dominio della frequenza e del tempo, resistività elettrica e polarizzazione indotta, rifrazione sismica e tomografia per ottenere una modellazione 3D dettagliata di una vecchia discarica e ridurre notevolmente gli errori specifici riconosciuti a ciascun metodo. In un altro studio la resistività elettrica a corrente continua e l'indagine elettromagnetica nel dominio della frequenza sono state utilizzate per va-

lutare il grado di contaminazione derivante dallo scarico indiscriminato di effluenti del trattamento della manioca in una discarica in Nigeria e si sono rivelati particolarmente efficienti nell'analisi della diffusione della contaminazione <sup>12</sup>. Al fine di approfondire lo studio delle indagini geofisiche nel paragrafo successivo ci concentreremo sull'analisi delle indagini geoelettriche e vedremo come queste sono state applicate in un caso studio di una discarica, rientrante nell'elenco dei siti potenzialmente inquinati.

## Un caso applicativo

Il caso studio presentato è relativo al piano di caratterizzazione di un'ex discarica comunale in cui si utilizza una combinazione di indagini dirette e indirette. La discarica copre un'area di 5500 m<sup>2</sup> ed è posta ad un'altezza di circa 440 m s.l.m. Per quanto riguarda le indagini condotte sul sito sono stati effettuati sondaggi a carotaggio continuo, analisi chimico-fisiche sui campioni di suolo e acqua, e 4 tomografie elettriche ed è su queste ultime in particolare che ci si concentrerà in questo elaborato. Le indagini geoelettriche si basano su misure di resistività e consistono nell'utilizzo di elettrodi. In particolare due di questi elettrodi avranno il compito di immettere corrente elettrica nel terreno, gli altri due di misurare la differenza di potenziale da cui ricavare i valori di resistività. Si tratta di indagini particolarmente sensibili in quanto la resistività costituisce un parametro fortemente variabile in relazione a svariati aspetti, e per questo si rivelano idonee in caso di terreni non particolarmente disturbati o accidentati che renderebbero l'interpretazione ulteriormente difficoltosa. Altri due importanti limiti di questo metodo sono gli ampi spazi richiesti, soprattutto se si intende effettuare investigazioni profonde, e la tipologia di terreno che non dovrà essere eccessivamente secca o comunque ghiaiosa evitando così di incorrere in difficoltà di accoppiamento tra elettrodi e terreno. Dal punto di vista pratico, al fine di automatizzare le misure, si procede, solitamente, distribuendo lungo un profilo un certo numero di elettrodi posti ad uguale distanza l'uno dall'altro e collegati tramite cavi elettrici ad una centralina che ne gestisce l'attivazione. In questo modo si otterranno valori di resistività apparente a differenti profondità e ubicazioni lungo il profilo stesso. La configurazione elettrodica scelta in questo caso studio è quella dipolo-dipolo (Figura 2) con distanza interelettrodica di 4,50 m nel primo stendimento e di 1 m negli altri tre. Le differenti distanze tra gli elettrodi sono state scelte al fine di raggiungere diverse profondità di investigazione infatti quando tale distanza aumenta, la profondità di investigazione nel sottosuolo cresce comportando però una perdita di dettaglio; gli stendimenti realizzati attraversano in direzione longitudinale e trasversale l'intera discarica.

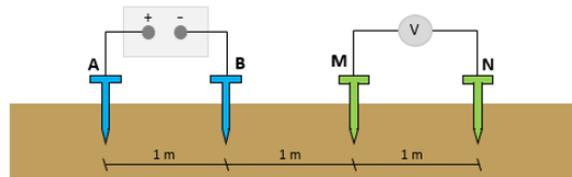


Figure 2: Configurazione dipolo-dipolo

Il risultato finale dell'elaborazione dei dati è un modello 2D di resistività del sottosuolo chiamato tomografia elettrica e dallo studio di tale modello è possibile individuare tre elettro-strati sub-orizzontali ben definiti: il primo si estende dal piano campagna fino ad una profondità di circa 4 m ed è caratterizzato da valori di resistività compresi tra 50 e 700 Ohm[?]/m correlabili alla presenza di rifiuti solidi urbani grossolani abbancati e asciutti; si notano in tale strato dei picchi di resistività da attribuire alla presenza di pneumatici stoccati nel corpo della discarica. Il secondo elettro-strato si individua a partire dal piano campagna per la sezione iniziale e finale per poi svilupparsi al di sotto del primo e fino alla profondità di 13 m ed è caratterizzato da bassi valori di resistività compresi tra 1 e 20 Ohm[?]/m da attribuire, in accordo alla litostratigrafia del sito, ai terreni argillosi presenti e alla presenza di rifiuti abbancati saturi di percolato. Il terzo ed ultimo strato individuato si estende dalla superficie inferiore del secondo fino alla massima profondità investigata, circa 30 m, ed è caratterizzato da valori di resistività superiori a 700 Ohm[?]/m imputabili alla presenza del substrato.

## Conclusioni

Le indagini indirette in questo caso studio sono state, quindi, eseguite principalmente allo scopo di ottenere una descrizione qualitativa e quantitativa del corpo della discarica e l'interpretazione delle tomografie ha consentito di individuare il punto di maggiore profondità della stessa, posto a circa 13 m, e di stimare complessivamente un volume di circa 40000 m<sup>3</sup>. In questo si riscontra l'importanza di questa tipologia di indagini che consentono appunto di ottenere una visione d'insieme del sito di interesse e di racchiudere la contaminazione all'interno di un certo volume, ma allo stesso tempo la necessità di prevedere nel piano di caratterizzazione altre tipologie di indagini che vadano ad integrare i risultati ottenuti dall'analisi delle tomografie e quindi a completare la caratterizzazione del sito in oggetto. La completa conoscenza della discarica sarà, infatti, raggiunta solo in seguito all'elaborazione dei risultati dei sondaggi e delle analisi chimico-fisiche previste. L'elaborato, dunque, vuole porgere l'attenzione sulla capacità delle tecniche di rilevamento geofisico di fornire una conoscenza complessiva e

areale di un certo fenomeno di contaminazione del suolo e informazioni piuttosto dettagliate in merito ai diversi aspetti della contaminazione in atto, attraverso misurazioni rapide e non invasive in grado di contemplare anche eventuali evoluzioni dell'inquinamento e fenomeni di migrazione. Si approfondisce poi nello specifico il metodo geoelettrico che, nell'ambito del caso studio analizzato, ha consentito di ottenere una descrizione complessiva del sito indagato e che, in generale, risulta essere, in combinazione ai campionamenti e alle analisi chimico-fisiche, uno dei più utilizzati ed efficaci metodi di indagine indiretta da applicare allo studio delle discariche. Si offre, quindi, la possibilità di riflettere sulle potenzialità dell'applicazione simultanea di più indagini indirette nella fase di caratterizzazione dei siti contaminati: pur presentando alcune difficoltà, esse consentono infatti di semplificare gli interventi in sito e di ridurre notevolmente le tempistiche sia in termini di ottenimento dei dati che per quanto riguarda poi l'elaborazione degli stessi.

## References

1. Giorgi, L. D. & Leucci, G. Passive and active electric methods: New frontiers of application. in *Innovation in Near-Surface Geophysics* 1–21 (Elsevier, 2019). doi:10.1016/b978-0-12-812429-1.00001-5.
2. Maio, R. D. *et al.*. An integrated geological geotechnical and geophysical approach to identify predisposing factors for flowslide occurrence. *Engineering Geology* **267**, 105473 (2020).
3. Pozdnyakova, L., Pozdnyakov, A. & Zhang, R. Application of geophysical methods to evaluate hydrology and soil properties in urban areas. *Urban Water* **3**, 205–216 (2001).
4. Maio, R. D. *et al.*. 3D geophysical imaging for site-specific characterization plan of an old landfill. *Waste Management* **76**, 629–642 (2018).
5. Shao, S. *et al.*. Mapping the contaminant plume of an abandoned hydrocarbon disposal site with geophysical and geochemical methods Jiangsu, China. *Environmental Science and Pollution Research* **26**, 24645–24657 (2019).
6. Wu, J. *et al.*. Evolution of bubble-bearing areas in shallow fine-grained sediments during land reclamation. *Engineering Geology* 105630 (2020) doi:10.1016/j.enggeo.2020.105630.
7. Wang, X. *et al.*. Geological controls on the occurrence of gas hydrate from core downhole log, and seismic data in the Shenhu area, South China Sea. *Marine Geology* **357**, 272–292 (2014).

8. Jana, S., Ojha, M., Sain, K. & Srivastava, S. An approach to estimate gas hydrate saturation from 3-D heterogeneous resistivity model: A study from Krishna-Godavari basin Eastern Indian offshore. *Marine and Petroleum Geology* **79**, 99–107 (2017).
9. Saneiyan, S., Ntarlagiannis, D., Werkema, D. D. & Ustra, A. Geophysical methods for monitoring soil stabilization processes. *Journal of Applied Geophysics* **148**, 234–244 (2018).
10. Morita, A. K. M., Souza Pelinson, N. de, Elis, V. R. & Wendland, E. Long-term geophysical monitoring of an abandoned dumpsite area in a Guarani Aquifer recharge zone. *Journal of Contaminant Hydrology* **230**, 103623 (2020).
11. Cossu, R., Pivato, A. & Raga, R. Preliminary risk assessment of old landfills in Italy. in *Environmental Health Risk II* (WIT Press, 2003). doi:10.2495/ehr030201.
12. Osinowo, O. O., Agbaje, M. A. & Ariyo, S. O. Integrated geophysical investigation techniques for mapping cassava effluent leachate contamination plume at a dumpsite in Ilero, southwestern Nigeria. *Scientific African* **8**, e00374 (2020).