## MONITORAGGIO GEOFISICO DEL DOMINIO NON SATURO IN UN SITO CONTAMINATO SOGGETTO A BONIFICA

L. Busato<sup>1</sup>, B. Mary<sup>2</sup>, M. Palladino<sup>3</sup>, N. Romano<sup>3</sup>, J. Boaga<sup>2</sup>, G. Cassiani<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro Interdipartimentale di Ricerca "Ambiente" (CIRAM), Università degli Studi di Napoli Federico II, Napoli (NA), Italy <sup>2</sup> Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi di Padova, Padova (PD), Italy

<sup>3</sup> Dipartimento di Agraria, Università degli Studi di Napoli Federico II, Napoli (NA), Italy

**Introduzione.** La bonifica di un sito contaminato è un processo ad elevato impatto ambientale ed economico mirato a ridurre la concentrazione di sostanze potenzialmente nocive per la salute e l'ambiente. Una delle tecniche maggiormente applicate è il fitorisanamento (Salt et al, 1995), basato sull'utilizzo di piante in grado di estrarre dal terreno metalli pesanti e di immagazzinarli all'interno del fusto e della chioma. Tali sostanze tossiche, infatti, non sono degradabili mediante biorisanamento (Salt *et al.*, 1995) e richiedono quindi procedure alternative (anche, possibilmente, alle tecniche tradizionali).

Il processo di bonifica è generalmente monitorato grazie alla combinazione di diverse discipline (chimica, biologia, ecc.), ma un ruolo importante è giocato dalla geofisica applicata, la quale fornisce metodi economici e con una potenzialmente elevata risoluzione temporale e spaziale. Una delle tecniche maggiormente utilizzate è la tomografia di resistività elettrica (ERT), sia con elettrodi in superficie che in foro (e.g. LaBrecque *et al..*, 1996), data la sua capacità di monitorare variazioni in saturazione, temperatura e concentrazione di ioni (LaBrecque *et al.*, 1996).

In questo lavoro, presentiamo i risultati preliminari del monitoraggio (durante il processo di bonifica) della porzione non satura del suolo di un sito contaminato. In particolare, il nostro sistema è costituito da tre sotto-sistemi 2D e 3D a diverse profondità, uno dei quali centrato su uno degli alberi usati per il fitorisanamento (Vanella *et al.*, 2018) e, al meglio delle nostre

conoscenze, tale approccio multi-scala non è stato utilizzato in precedenza in siti contaminati sottoposti a bonifica.

Il fondo agricolo di San Giuseppiello ed il protocollo LIFE/ECOREMED. Il sito di San Giuseppiello (Giugliano in Campania - NA) consiste in un fondo agricolo soggetto, tra il 1998 ed il 2003, allo sversamento illegale di fanghi di concerie ed industrie, oltre a 22 t di scarti di pellame (Balestri, 2010). Esso rientra all'interno dell'"area vasta" situata tra le provincie di Napoli e Caserta (nota per l'elevata presenza di siti contaminati e/o potenzialmente inquinati) ed è attualmente posto sotto sequestro giudiziario (Procedimento Penale nº 15968/08 rg.nr. mod.21). La caratterizzazione del sito ha evidenziato la presenza di elevate concentrazioni di cromo ed idrocarburi pesanti nel primo metro di profondità e di composti organici volatili (COV) nella falda sottostante, rendendo così necessaria la messa in sicurezza del sito (D. Lgs. 152/2006). La bonifica è basata sul protocollo LIFE/ECOREMED (www.ecoremed.it) mediante la piantumazione di pioppi (Populus nigra) con sesto d'impianto 3x1 m unitamente all'inoculamento di batteri biodegradatori per accelerare la degradazione degli idrocarburi, mentre la decontaminazione da COV ha luogo grazie al processo di air-stripping. La scelta di questo protocollo di bonifica è legata a tre vantaggi: (i) l'impianto forestale garantisce un presidio attivo ed impedisce l'uso improprio del sito, (ii) i costi sono notevolmente ridotti rispetto ad una bonifica "tradizionale" (€ 956.250,00 vs. € 18 milioni), e (iii) tale protocollo consente di non modificare la destinazione d'uso del sito stesso, al contrario di quanto avviene con le tecniche tradizionali, generalmente basate sulla rimozione del suolo contaminato e sulla successiva trasformazione in terreno edificabile (www.ecoremed.it).

Da un punto di vista geologico, il fondo agricolo di San Giuseppiello è prevalentemente costituito da suoli di origine vulcanica con granulometria sabbio-limosa (pozzolana), fortemente rimaneggiati e mescolati con materiali antropici fino a 2 m profondità e con inclusione di pomici chiare ad una profondità di circa 2 m dal piano campagna (Balestri, 2010). La falda è ad una profondità di 40 m.

**Metodi ed acquisizioni.** La caratterizzazione del sito mediante tomografia di resistività elettrica (ERT; Binley and Kemna, 2005) è basata su un sistema di monitoraggio costituito da tre sotto-sistemi cross-well a diversa profondità con elettrodi in acciaio inox:

- Sotto-sistema 3D: 4 pozzetti superficiali (profondità 1.2 m) posizionati ai vertici di un quadrato centrato su uno dei pioppi, con lato pari a 1.15 m. Ogni pozzetto contiene 12 elettrodi spaziati 0.1 m. In aggiunta, 24 elettrodi superficiali formano una griglia equispaziata attorno al tronco del pioppo, per un totale di 72 elettrodi;
- Sotto-sistema 2D: 2 pozzetti di profondità 3 metri, distanti 1.38 m, ciascuno contenente 24 elettrodi spaziati 0.12 m, combinati con 13 elettrodi superficiali equispaziati, per un totale di 61 elettrodi. Questo sotto-sistema è posizionato tra due filari adiacenti, parallelamente ai filari stessi, in prossimità del sotto-sistema 3D;
- Sotto-sistema 2D: 2 pozzetti di profondità 10 metri, distanti 5 m, ciascuno contenente 24 elettrodi spaziati 0.4 m. Tra i due pozzetti, in superficie, sono posizionati 13 elettrodi equispaziati, per un totale di 61 elettrodi. Questo sotto-sistema è parallelo ed adiacente al sotto-sistema precedente;

Le misure sono state effettuate nei giorni 6 giugno, 24 luglio e 25 luglio 2018 (Tab. 1) utilizzando sequenze dipolo-dipolo skip-4 e con l'acquisizione di misure dirette e reciproche, necessarie per la stima dell'errore. Lo strumento utilizzato è un georesistivimetro Syscal Pro (IRIS Instruments).

Per il sito in esame, la soglia di errore è fissata al 10%: nei dataset 3D e 2D con pozzetti di 3 metri le misure salvate variano tra il 70% ed il 98% del totale, indicando un'elevata qualità dei dataset, mentre per il sotto-sistema 2D con pozzetti di 10 metri le misure salvate variano tra il 54% ed il 57%. Questo è dovuto ad un problema in uno dei due pozzetti di 10 metri, probabilmente conseguenza dell'installazione dello stesso, in quanto alcuni elettrodi risultano non in contatto con il terreno o scollegati.

6 giugno 2018	
Sotto-sistema	Ora inzio
3D	13:05
2D – 3 metri	11:15
2D – 10 metri	12:00
24 luglio 2018	
Sotto-sistema	Ora inzio
3D	13:45
2D – 3 metri	11:30
2D – 10 metri	10:20
25 luglio 2018	
Sotto-sistema	Ora inizio
3D	9:40, 12:25
2D – 3 metri	14:50
2D – 10 metri	15:30

Tab. 1 - Data e ora di inizio delle acquisizioni ERT nel sito di San Giuseppiello. La durata media delle acquisizioni è di circa 25 minuti.

La natura dei dati a nostra disposizione permette due tipi di inversione: l'inversione dei dati assoluti e l'inversione in *time-lapse*. Per entrambe le tipologie di inversione, sono stati utilizzati i codici R2 (dataset 2D; Binley, 2016) e R3t (dataset 3D; Binley, 2013), basati su un'inversione alla Occam. L'errore fissato per l'inversione dei dati assoluti è pari a 10%, mentre per l'inversione in *time-lapse*, il cui approccio è quello proposto da Daily et al. (1992), è abbassato al 5%.

**Risultati e discussione.** Inversione dei dati assoluti. I risultati dell'inversione dei dati assoluti del sotto-sistema 3D mostrano distribuzioni di resistività confrontabili. Infatti, il dominio investigato può sempre essere suddiviso in due porzioni, una più superficiale con resistività media inferiore a 300  $\Omega$ m ed una più profonda con resistività tra 350 e 500  $\Omega$ m (Fig. 1). Si può inoltre notare come passando da giugno (Fig. 1a) a luglio (Fig. 1d) la resistività diminuisca soprattutto nella porzione più profonda.



Fig. 1 Sotto-sistema 3D. Distribuzione di resistività ottenuta dall'inversione dei dati assoluti per le date di a) 6 giugno, b) 24 luglio, c) 25 luglio ore 9:40 e d) 25 luglio ore 12:25. I pallini neri indicano la posizione degli elettrodi (sia in superficie che in foro).

Le sezioni 2D di resistività assoluta per il sotto-sistema con pozzetti profondi 3 metri sono caratterizzate da resistività in media maggiore in superficie, con zone con valori anche superiori a 500  $\Omega$ m, mentre la parte più inferiore (a partire da circa 1.75 m di profondità) mostra resistività più basse, mediamente inferiori a 300  $\Omega$ m.

Infine, i risultati dell'inversione dei dati assoluti per il sotto-sistema 2D con pozzetti profondi 10 metri mostrano un range di resistività maggiore rispetto ai sotto-sistemi precedenti (compreso tra 20 e 2000  $\Omega$ m) con i valori maggiori sono presenti nella porzione più superficiale, fino ad un massimo di circa 7 metri di profondità.

**Inversione in** *time-lapse*. Sono state effettuate due inversioni in *time-lapse*, la prima avente come misura di background l'acquisizione del 6 giugno, la seconda con background la misura del 24 luglio (Fig. 2). I rapporti di luglio rispetto a giugno mostrano una diminuzione di resistività nella porzione destra del dominio (valori inferiori a 100%), che si approfondisce all'aumentare delle ore. Lo stesso può essere osservato anche nella parte superiore sinistra dell'immagine. Il resto del dominio investigato è invece caratterizzato da un aumento di resistività (valori superiori a 100%). I rapporti di luglio mostrano le stesse caratteristiche del *time-lapse* precedente, in quanto buona parte del dominio è soggetta ad una diminuzione di resistività, più marcata passando dalla misura delle 9:40 a quella delle 12:25. La porzione sinistra è invece caratterizzata da un marcato aumento di resistività, così come alcune porzioni più superficiali.

Si noti che le scale utilizzate per la rappresentazione dei risultati sono diverse: nella prima, infatti, le variazioni sono maggiori poiché maggiore è il tempo intercorso tra la misura di background e le successive. Questo è dovuto al fatto che il *time-lapse* mostra l'effetto cumulativo dei processi che hanno avuto luogo e che hanno, in conseguenza, modificato la resistività.

Anche per il sotto-sistema 2D con pozzetti di 3 metri sono stati effettuati due tipi di inversioni in **time-lapse**. I risultati dell'inversione con l'acquisizione di giugno come background sono entrambe caratterizzate da una diminuzione di resistività nel primo metro al di sotto della superficie, seguita da un incremento generale a profondità maggiori. Nel caso dell'inversione della misura del 25 luglio rispetto a quella del giorno precedente, invece, la maggior parte delle variazioni avviene a profondità maggiori di 1 metro, dove sono presenti delle aree che mostrano un incremento di resistività.



Fig. 2 Sotto-sistema 3D. Risultati dell'inversione in time-lapse per il sotto-sistema 3D. Le figure i), ii) e iii) mostrano i rapporti di luglio rispetto alla misura di giugno, le figure iv) e v) mostrano invece i rapporti del 25 luglio rispetto alla misure del 24 luglio. I pallini neri indicano la posizione degli elettrodi (sia in superficie che in foro).

Per quanta riguarda il terzo sotto-sistema, invece, l'inversione in *time-lapse* non è stata fatta a causa della scarsa qualità dei dataset: il common set è infatti costituito solo da 500 misure.

**Discussione.** L'analisi dei risultati assoluti ed in *time-lapse* richiede informazioni ausiliarie (ad es. contenuto idrico e temperatura del suolo, profondità della tavola d'acqua) necessarie per interpretare correttamente la distribuzione e la variazione di resistività osservate. Nonostante tali dati non siano ancora disponibili, i risultati preliminari a nostra disposizione permettono di ottenere già alcune informazioni. Il dominio investigato presenta caratteristiche omogenee nel tempo, molto probabilmente legate alla geologia del sito stesso. Tuttavia, la maggior parte delle informazioni deriva dal *time-lapse* 3D, che mostra delle variazioni di resistività molto probabilmente legate all'irrigazione che ha avuto luogo il 24 luglio. Anche se in via del tutto qualitativa, tali variazioni permettono di ipotizzare l'infiltrazione dell'acqua a profondità comparabili con quelle dei pozzetti. Solo da un confronto con le sonde in sito sarà, però, possibile legare la variazione di resistività osservata con la variazione di altri parametri caratteristici.

**Conclusioni.** Il monitoraggio della bonifica di un sito contaminato è parte integrante del processo stesso, necessario per stabilire l'efficacia delle procedure messe in atto. Nel caso della fitodepurazione, è particolarmente rilevante ottenere informazioni riguardanti le strutture e, soprattutto, i processi che hanno luogo nel dominio non saturo, per ottenere informazioni spaziali altrimenti non ottenibili con altri mezzi. Nonostante i limiti di questi risultati preliminari, e la mancanza di confronto con dati ausiliari (tutt'ora in fase di analisi), l'ERT si conferma una tecnica di supporto al monitoraggio multi-scala di processi di bonifica. In futuro, lo studio sarà completato con lo sviluppo di un modello idrologico mirato ad unire le informazioni geofisiche con quelle ausiliarie, per descrivere più compiutamente i processi che caratterizzano il dominio non saturo del sito di San Giuseppiello.

## Bibliografia

Balestri G.; 2010: Consulenza Tecnica nei luoghi di cui al decreto di sequestro probatorio del 17/07/08 e segg. nelle Località: Masseria del Pozzo, Schiavi e San Giuseppiello in Giugliano in Campania; terreni in SP Trentola-Ischitella in Trentola e in Torre di Pacifico in Lusciano e siti non sequestrati in Castel Volturno o oggetto di precedenti sequestri in loc. Scafarea (Giugliano). http:// corrieredelmezzogiorno.corriere.it/campania/media/fissi/ pdf/

Binley A.; 2013: R3t, v. 1.8. http://www.es.lancs.ac.uk/people/amb/Freeware/R3t/R3t.htm

- Binley A.; 2016: R2, v. 3.1. http://www.es.lancs.ac.uk/people/amb/Freeware/R2/R2.htm
- Binley A. and Kemna A.; 2005: DC resistivity and induced polarization methods. In Hydrogeophysics (pp. 129-156). Springer, Dordrecht.
- Daily W., Ramirez A., LaBrecque D., Nitao J.; 1992: Electrical resistivity tomography of vadose water movement. Water Resour. Res., 28, 1429–1442, DOI 10.1029/91WR03087
- LaBrecque D.J., Ramirez A.L., Daily W.D., Binley A.M., Schima, S.A.; 1996: ERT monitoring of environmental remediation processes. Meas. Sci.Technol., 7(3), 375, DOI 10.1088/0957-0233/7/3/019
- Salt D.E., Blaylock M., Kumar N.P., Dushenkov V., Ensley B.D., Chet I., Raskin, I.; 1995: Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. Nat. Biotechnol, 13(5), 468, DOI 10.1038/nbt0595-468
- Vanella D., Cassiani G., Busato L., Boaga J., Barbagallo S., Binley A., Consoli, S.; 2018: Use of small scale electrical resistivity tomography to identify soil-root interactions during deficit irrigation. J. Hydrol., 556, 310-324, DOI 10.1016/j.jhydrol.2017.11.025