

UNA TECNOLOGIA INNOVATIVA DI GREEN REMEDIATION: APPLICAZIONI IN SITO, MODELLAZIONE E SIMULAZIONE MATEMATICA

**I. JUBANY, M. CALDERER, X. GÓMEZ, M. D. RIERA ¹, V. MARTÍ ², C. B.
MOSANGINI, R. VERRI, F. CARIDEI ³ e F. BORRINO ⁴**

¹ Centre Tecnològic. Plaça de la Ciència 2, 08243 Manresa, Spagna,
² Universitat Politècnica de Catalunya, Chemical Engineering Department,
ETSEIB, Av. Diagonal, 647, 08028 Barcellona, Spagna, ³ Ecosurvey® LA152,
Via Don Minzoni 11, 40121 Bologna, Italia, ⁴ Felsilab, Via Correnti 3 D-E,
40132 Bologna, Italia.

e-mail: irene.jubany@ctm.com.es

SOMMARIO

SmartStripping® è una tecnica innovativa di Green Remediation per la bonifica di siti contaminati che reduce le concentrazioni di composti organici volatili e semi-volatili (VOC e sVOC) dal sottosuolo saturo ed insaturo. Si differenzia dalle altre tecniche di bonifica poiché genera un “flusso di aria a ciclo chiuso” nel sottosuolo che estrae i contaminanti organici senza emissioni di gas in atmosfera, senza l'estrazione delle acque sotterranee, senza scarichi idrici e non necessita l'introduzione di prodotti chimici.

Parole chiave: GreenRemediation, VOC – sVOC extraction, EcoInnovation, Ecosurvey.

1. INTRODUZIONE

Quest'articolo si propone di sottolineare il ruolo chiave delle tecnologie di Green Remediation per la decontaminazione del sottosuolo anche in relazione alla recente comunicazione della Commissione europea: "Verso un'economia circolare: un programma a rifiuti zero per l'Europa" [2].

In accordo con gli scopi della Green Remediation, della Direttiva 2010/75/EU e del D.Lgs 152/2006 è stato sviluppato un processo innovativo, SmartStripping® [1], in grado di ridurre le concentrazioni dei Composti Organici Volatili (VOC e sVOC) nei terreni insaturi e nelle acque sotterranee di siti industriali e civili preservando le acque di falda e senza il rilascio di contaminanti organici in atmosfera, in fognatura o in altri corpi idrici. La tecnologia è sottoposta ad processo di standardizzazione e simulazione attraverso applicazioni on-site, prove di laboratorio e simulazione mediante software di modellazione.

2. DESCRIZIONE DELLA TECNOLOGIA

La tecnologia può essere definita una combinazione e miglioramento delle tecniche di bonifica esistenti Air Sparging (AS) [4, 6] e Soil Vapor Extraction (SVE) [5]. La bonifica

delle acque sotterranee avviene innescando il trasferimento dei contaminanti dalla zona satura (acque sotterranee) alla zona insatura (zona vadosa) mediante l'insufflaggio di un ciclo chiuso di aria in falda. Il sistema provoca lo strippaggio e la liberazione dei VOC e sVOC dalle acque sotterranee che migrano dalla zona satura alla zona insatura. Nella zona insatura è generato uno stato di depressione in modo da estrarre e convogliare il flusso di aria contaminato in un sistema di depurazione a carboni attivi, prima di essere nuovamente insufflato nelle acque sotterranee per ri-attivare il processo di strippaggio a ciclo chiuso e continuo di aria, come indicato in Figura 1.

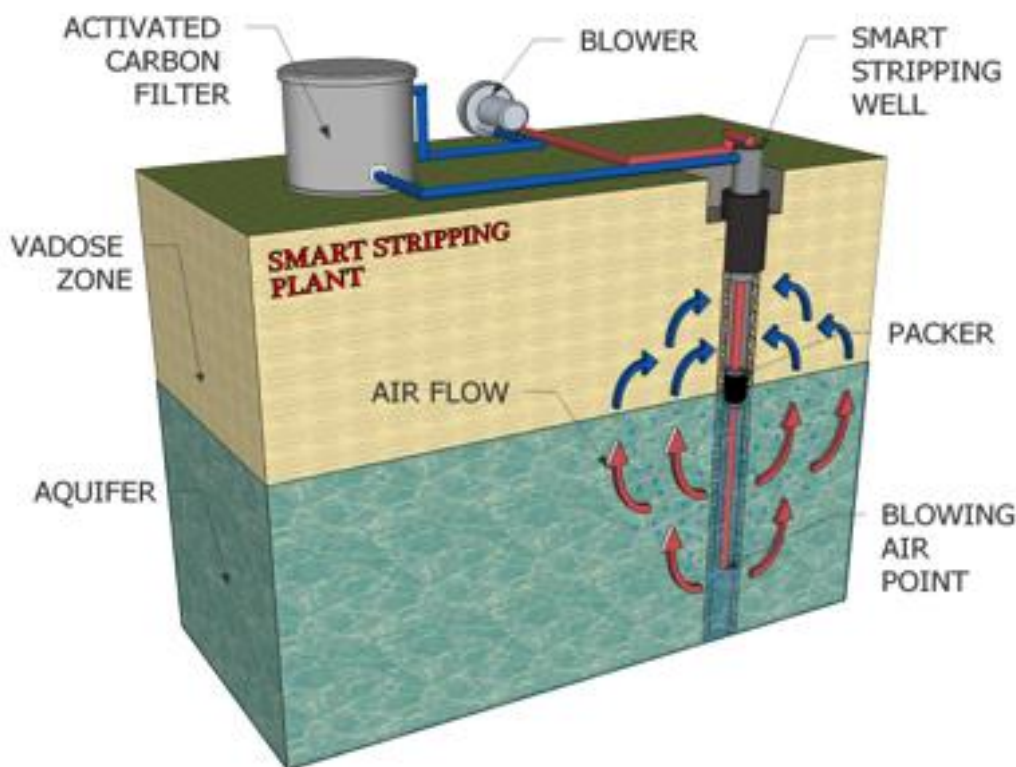


Figura 1: Schema della tecnologia.

3. APPLICAZIONI IN SITO

L'elevata efficacia della tecnologia è stata osservata nella bonifica delle acque sotterranee di una decina di siti ubicati in Italia nei quali sono stati misurati risultati rilevanti. Dopo tre mesi di applicazione della tecnologia in terreni omogenei a medio-alta permeabilità, sottostanti un deposito industriale di carburanti in provincia di Parma, nelle acque sotterranee sono state riscontrate le seguenti riduzioni di concentrazioni: Idrocarburi totali da 10.000 µg/l a <10 µg/l, MTBE da 3000 µg/l a < 0,5 µg/l e Idrocarburi Aromatici totali da 1.200 µg/l a < 1 µg/l. Dopo diciotto mesi di applicazione della tecnologia, in punto vendita carburanti in provincia di Grosseto sono state osservate le seguenti riduzioni di concentrazioni: Idrocarburi totali da 2.000 µg/l a <50 µg/l, MTBE da 6.000 µg/l a < 75 µg/l e Idrocarburi Aromatici totali da 100 µg/l a < 1 µg/l. Tre casi di studio sono attualmente applicati in siti con terreni da bassa a media permeabilità con acque sotterranee superficiali contaminate da composti clorurati con concentrazioni massime di 18.000 µg/l per il tricloroetilene, 7.000 µg/l per il tetracloroetilene e 27.000 µg/l per 1,2 dicloroetilene.

Il sistema di monitoraggio periodico dei tre siti attualmente operativi include la verifica della qualità delle acque sotterranee, del flusso d'aria di ri-circolazione e dei carboni attivi che catturano i contaminati e depurano l'aria prima del riutilizzo in falda. Per il contaminante maggiormente rappresentato (1,2 dicloroetilene) è stato osservato il ciclo di cattura esposto in figura 2.

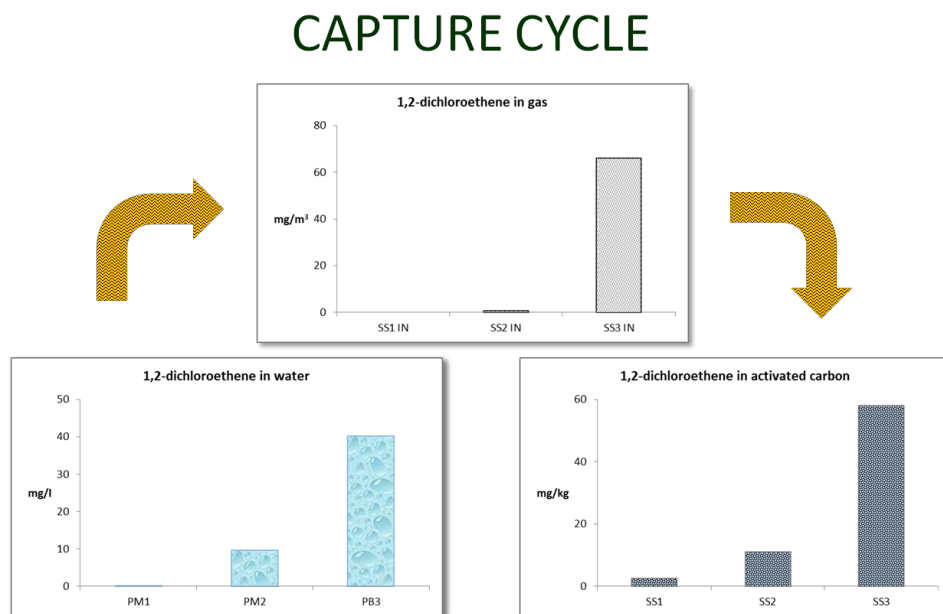


Figura 2: Ciclo di cattura dei contaminati operato dal sistema di bonifica.

Il parametro 1,2_dicloroetilene presente inizialmente nelle acque sotterranee passa allo stato gassoso come effetto dello strippaggio operato dal sistema di bonifica a ciclo chiuso e risulta catturato dai carboni attivi, in ciascuno dei 3 impianti oggetto di sperimentazione, proporzionalmente con le concentrazioni presenti inizialmente nelle acque sotterranee.

L'efficienza della tecnologia è basata sull'equilibrio del circuito chiuso del flusso di aria indotto nel sottosuolo ed è funzione dei seguenti parametri che determinano le caratteristiche ed i settaggi degli impianti: permeabilità del suolo saturo, permeabilità all'aria del terreno insaturo, tessitura del terreno, livello delle acque sotterranee. La tecnologia è adatta per eliminare i composti organici (VOC e sVOC) caratterizzati da una pressione di vapore $> 0,5$ mm, costante di Henry superiore a $1,93 \cdot 10^{-4}$ atm·m³/mol e punto di ebollizione < 280 °C a 1 atm. Valori di bassa solubilità in acqua dei contaminanti migliora la loro transizione di fase a vapore.

4. SIMULAZIONI IN LABORATORIO

L'applicazione di questa tecnologia per ciascun sito specifico è supportata da un modello matematico e da simulazioni in scala di laboratorio che consentono la progettazione sito specifica degli interventi di bonifica in funzione dei parametri operativi.

Nel presente lavoro è stato sviluppato un modello idrodinamico e di trasferimento di massa della tecnologia, calibrato mediante specifici test di laboratorio.

Il modello idrodinamico ha consentito di ottenere una regione di gorgogliamento dell'aria considerata continuamente agitata che definisce un volume perfettamente miscelato (V_r) dove è stato assunto uno scambio tra fase liquida e aria dovuto al trasferimento di massa [3]. All'interno di questo volume avviene l'estrazione del contaminante dalla fase liquida

alla fase gassosa (strippaggio). Inoltre, esiste un effetto laterale dovuto al gradiente tra la concentrazione iniziale di contaminante in falda (C_o) e la concentrazione nella zona di gorgogliamento (C). In condizioni stazionarie il flusso laterale è uguale al flusso di contaminanti volatili estratti attraverso il flusso d'aria.

Utilizzando questi elementi, tre bilanci di massa dei contaminanti volatili possono essere calcolati nell'interfaccia aria/acqua di gorgogliamento, in acqua ed in aria. Da questi bilanci di massa, il tasso di rimozione di contaminanti volatili, la concentrazione (C) e la pressione parziale (p) dei contaminanti volatili nel flusso d'aria in uscita possono essere ricavati in funzione del tempo.

Il modello sviluppato è stato calibrato usando un esperimento di stripping eseguito in laboratorio consistente in un contenitore predisposto con sabbia e soluzione acquosa di etanolo $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$ in cui l'aria è stata fatta gorgogliare a $1,3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$. Il carbonio organico disciolto è stato misurato ad intervalli di tempo per 25 giorni. Il volume V_r è stato calcolato assumendo una forma conica per la zona di gorgogliamento. I dati sperimentali sono stati introdotti nel modello utilizzando il software Polymath 6.20 per risolvere le equazioni differenziali ed ottenere i valori dei coefficienti di trasferimento di massa.

5. MODELIZZAZIONE SOFTWARE

Il calcolo numerico mediante il metodo degli elementi finiti (ABAQUS, CFX-ANSYS®) è stato utilizzato per simulare il comportamento idrodinamico della tecnologia considerando i seguenti parametri di ingresso: configurazione del pozzo, proprietà del sottosuolo e parametri operativi come indicato in Figura 3 per la simulazione della velocità dell'aria. L'effetto di ciascun parametro sulle dimensioni e forma della zona d'influenza del processo di bonifica (ZOI) è stato studiato al fine di identificare le proprietà rilevanti nello svolgimento del processo di stripping. I parametri di uscita dal calcolo idrodinamico sono stati successivamente inseriti nel modello numerico di trasferimento di massa. Il modello è basato sul presupposto che lo stripping avviene nella ZOI e che la diffusione è il processo più rilevante nella zona circostante la ZOI. Il modello di trasferimento di massa ha considerato due coefficienti di scambio principali: il trasferimento di massa durante lo stripping e la diffusione. I parametri di trasferimento di massa per ogni contaminante e le specifiche proprietà del sottosuolo sono stati calibrati sulla base dei dati sperimentali. Inoltre, lo studio è stato integrato mediante la simulazione con il software MATLAB delle curve per l'assorbimento dei contaminanti nei filtri a carbone attivo granulare.

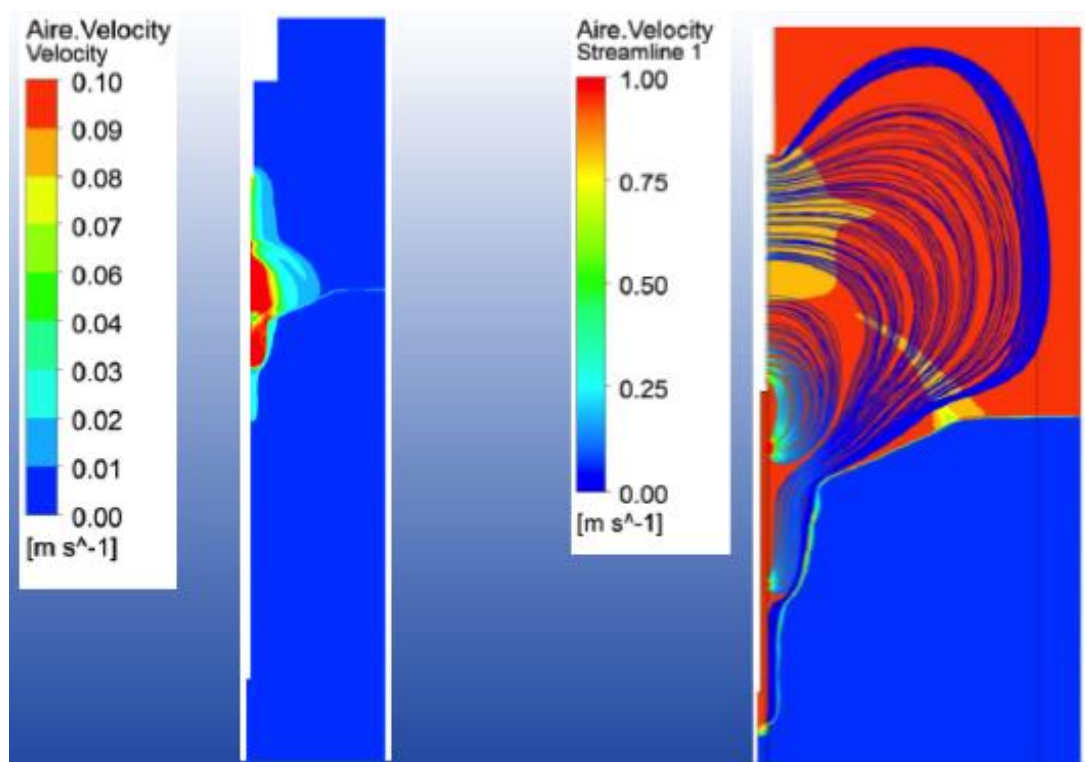


Figura 3: Simulazione velocità dell'aria nella zona satura ed insatura attorno al pozzo di bonifica.

6. CONCLUSIONI

La tecnologia di Green Remediation applicata in questa sperimentazione consente la decontaminazione del sottosuolo mediante l'applicazione di un "flusso di aria a ciclo chiuso" nel sottosuolo che estrae i contaminanti organici senza emissioni di gas in atmosfera, senza l'estrazione delle acque sotterranee, senza scarichi idrici e non necessita l'introduzione di prodotti chimici.

In merito alla salvaguardia della risorsa idrica nel sottosuolo durante l'esercizio di questa applicazione di Green Remediation è possibile valutare significativi risparmi di acqua ad ogni applicazione. Infatti, considerando cicli di rigenerazione dei filtri di carboni attivi granulari da 600 kg (filtri con capacità di rimozione contaminanti poco inferiore al 50% in peso) ed una concentrazione media di contaminanti organici nelle acque sotterranee nell'ordine di 10.000 µg/l, l'estrazione di ca. 300 kg/ciclo di contaminanti equivale ad un volume di acqua depurata, e non estratta dal sottosuolo, di ca. 30.000 mc/ciclo.

La comparazione di questa tecnologia di Green Remediation con i tradizionali processi di bonifica (Pump and Treat-P&T, Air Sparging-AS, Soil Vapor Extraction-SVE + Air Sparging-AS, In Well Stripping-IWAS e Barriera Reattiva Permeabile-BRP), è schematizzati in Figura 4.

Descrizione	SS	P & T	AS	SVE/AS	IWAS	PRB
Utilizzo pozzi esistenti per la bonifica	😊	😞	😞	😞	😞	n.a.
Minimo disturbo alle attività del sito durante il funzionamento del sistema	😊	😞	😊	😞	😞	😊
Trattamento acque sotterranee (zona satura)	😊	😊	😊	😊	😊	😊
Trattamento sottosuolo (zona insatura)	😊	😞	😞	😊	😊	😞
Le acque depurate non sono scaricate in fognatura o corsi superficiali	😊	😞	😊	😊	😊	😊
I VOC estratti dall'acqua non sono immessi in atmosfera	😊	n.a.	😞	😞	😞	n.a.
I costi di esercizio sono generalmente bassi	😊	😞	😊	😞	😞	😊
La quantità di rifiuti prodotti è generalmente bassa	😊	😞	😊	😞	😊	😊
Non occorrono autorizzazioni per lo scarico delle acque	😊	😞	😊	😊	😊	😊
Non occorrono autorizzazioni per emissioni in atmosfera	😊	😊	😊	😞	😞	😊
Durata della bonifica generalmente ridotta	😊	😞	😊	😊	😞	😞
Costi competitivi	😊	😞	😞	😞	😊	😞
La ventilazione favorisce la degradazione dei contaminati organici nel suolo	😊	😞	😊	😊	😊	😞
Riduce le vie di esposizione per l'Analisi di Rischio Sanitario Ambientale	😊	😞	😞	😊	😊	😞

Figura 4: Confronto tra SmartStripping (SS) ed altre tecnologie di bonifica (P&T, AS, SVE/AS, IWAS, PRB).

RINGRAZIAMENTI

La Commissione Europea supporta e co-finanzia questo progetto di Green Remediation nell'ambito dell'iniziativa Eco-Innovation, ECO/10/277350/SI.599553.

BIBLIOGRAFIA

1. Caridei F., (2007), Sistema e metodo di bonifica del sottosuolo. Italy patent No. 0001378816.
2. European Commission (2014), Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni Verso un'Economia Circolare: Programma per un'Europa a Zero Rifiuti, 52014DC0398, URL: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52014DC0398>.
3. Levenspiel O., (1999), Chemical reaction engineering, Ed. Wiley, New York.
4. Suthersan, S.S., (1999), 'Air Sparging, Remediation engineering, Design concepts', Ed. Suthan S. Suthersan Boca Raton, CRC Press LLC.
5. Suthersan, S.S., 'Soil Vapor Extraction, Remediation engineering, Design concepts', Ed. Suthan S. Suthersan Boca Raton, CRC Press LLC.
6. Wilson, D. J., Norris, R. D, and Clarke, A. N., (1996), 'Groundwater Cleanup by In-situ Sparging: Air Channeling Model for Nonaqueous Phase Liquid Removal', Separation Science and Technology, 31 (7), 915-939.