



DICATAM
Università degli Studi
di Brescia



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

DICEA
Sapienza, Università di Roma



**Università
di Catania**

DICAR
Università degli Studi
di Catania

SiCon 2026

***Workshop su: Siti Contaminati. Esperienze negli interventi di
risanamento***

11-13 Febbraio 2026

BONIFICA IN SITU DI IDROCARBURI CON CARBONE ATTIVO COLLOIDALE: EVIDENZE DA UN'ANALISI STATISTICA

Michel Benedettini*, Alberto Deambrogio*, Mariangela Donati**

* Petroltecnica S.p.A.,
Via Rovereta 32, 47853 Coriano (RN),
michel.benedettini@petroltecnica.it
alberto.deambrogio@petroltecnica.it

** Regenesi,
Via Torquato Tasso 5 – 10122 Torino (TO)
mdonati@regenesi.com

BONIFICA IN SITU DI IDROCARBURI CON CARBONE ATTIVO COLLOIDALE: EVIDENZE DA UN'ANALISI STATISTICA

Michel Benedettini^{1*}, Alberto Deambrogio¹, Mariangela Donati²

¹ Petroltecnica S.p.A., Via Rovereta 32, 47853 Coriano (RN), michel.benedettini@petroltecnica.it; alberto.deambrogio@petroltecnica.it

² Regenesi, Via Torquato Tasso 5 – 10122 Torino (TO), mdonati@regenesi.com

* Corresponding Author: Michel Benedettini, michel.benedettini@petroltecnica.it:

Sommario. Il trattamento in situ usando carbone attivo colloidale (CAC) iniettabile rappresenta un'evoluzione importante nelle strategie di bonifica in situ di siti contaminati da idrocarburi. L'introduzione recente di formulazioni contenenti CAC e accettori di elettroni ha permesso di semplificare gli interventi, riducendo il numero di applicazioni necessarie e migliorando la stabilità dei risultati nel tempo.

Questa tecnologia si è dimostrata particolarmente efficace in contesti operativi complessi, come siti attivi con accessibilità limitata e necessità di ridurre le interferenze con le attività in superficie. Petroltecnica ha applicato il CAC in oltre 50 siti italiani, tra cui punti vendita carburante, depositi e stabilimenti industriali. L'ampia raccolta di dati ha consentito un'analisi statistica dettagliata, volta a valutare l'efficacia degli interventi rispetto agli obiettivi di bonifica, ai tempi di abbattimento delle concentrazioni e alla persistenza dei risultati ottenuti.

Durante la presentazione saranno illustrate, oltre a tale analisi statistica, alcuni casi studio rappresentativi, che evidenziano la versatilità della tecnologia in diverse configurazioni (aree sorgente, plume, hot-spot), con tipologie di contaminanti e concentrazioni iniziali variabili. Verranno inoltre fornite indicazioni operative basate sull'esperienza in campo, riguardanti le modalità di applicazione, la spaziatura tra i punti di iniezione e le attività di monitoraggio post-intervento.

INTRODUZIONE

La bonifica in situ di contaminazioni da idrocarburi presso siti operativi e dismessi richiede strumenti rapidi, stabili e compatibili con vincoli logistici. Il carbone attivo colloidale (CAC) in formulazione liquida, combinato con ammendanti a base di nitrati e solfati, consente di rimuovere rapidamente gli idrocarburi in fase disciolta e di stimolare processi di biodegradazione anaerobica della massa adsorbita, riducendo nel tempo il rischio di rebound e garantendo longevità del trattamento.

La presente analisi, sviluppata congiuntamente da Petroltecnica e REGENESIS, consolida dati e risultati di interventi PetroFix® in Italia e fornisce tre esempi applicativi.

TECNOLOGIA PETROFIX E PROCESSO ISSB

Il prodotto, denominato commercialmente PetroFix, è composto da carbone attivo colloidale che combina carbone alla microscala con sali di nitrato (NO_3^-) e solfato (SO_4^{2-}) che fungono da elettro-accettori.

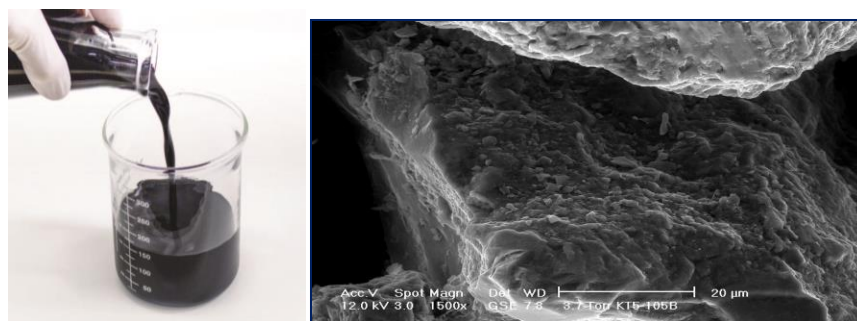


Figura 1. Sinistra: PetroFix, carbone attivo colloidale iniettabile. Destra: particella di sabbia rivestita di PetroFix

La distribuzione avviene a bassa pressione e alto volume nelle zone di flusso, ottenendo un rivestimento del suolo con forte capacità di adsorbimento e innescando la biodegradazione anaerobica dei contaminanti adsorbiti. L'effetto combinato porta alla rigenerazione degli spazi di adsorbimento del carbone e alla longevità del trattamento.

L'approccio ISSB (In Situ Sorption & Biodegradation) viene ingegnerizzato per aumentare il tempo di ritenzione dei contaminanti e bloccare la migrazione, con impatti minimi su piezometri e infrastrutture rispetto a mezzi adsorbenti in polvere (PAC) o granulari (GAC) che richiedono pressioni elevate con forte rischio di fratturazione.



Figura 2. Iniezione mediante tecnica direct push. Rivestimento a bassa pressione delle zone di flusso permeabili.

ANALISI STATISTICA

Petroltecnica ha applicato PetroFix in oltre 50 siti; su 47 applicazioni recenti è stata eseguita un'analisi statistica riguardante litologia, tipologia di contaminanti, modalità e configurazione degli interventi, tempi di risposta e raggiungimento degli obiettivi previsti. La raccolta dati è avvenuta tramite interviste ai Project Manager che si sono occupati della gestione degli interventi e revisione dei dati di monitoraggio.

Dati sintetici:

- >50 siti trattati;
- ~90.000 kg di reagente complessivamente utilizzato;
- ~16 punti di iniezione per sito in media;
- spessore medio di trattamento ~3,8 m;
- nel 88% dei siti PetroFix è stato l'unico reagente utilizzato.

Configurazioni di intervento e ubicazione

Le modalità di applicazione osservate sono:

- direct-push,
- aste valvolate,
- pozzi di iniezione,
- applicazione in scavo.

Nelle applicazioni mediante iniezione, è stato possibile iniettare a bassa pressione e alto volume, senza riduzione della permeabilità e con possibilità di verifica della presenza del reagente (tracciante di sé stesso grazie alla colorazione nera).

Ubicazione degli interventi analizzati:

- ~26% interventi in area sorgente,
- ~68% sul plume,
- ~6% su hot-spot.

Contaminanti trattati e livelli di concentrazione presenti

Ampio range di contaminanti trattati:

- idrocarburi totali (TPH),
- BTEX,
- IPA,
- eteri ossigenati (MTBE/ETBE),

Concentrazioni: livelli da bassi a molto elevati (fino a $>10\times$ CSC), in due siti è stata rilevata presenza di LNAPL.

Criticità operative e mitigazioni (lessons learned)

Durante le iniezioni sono state riscontrate criticità in meno di un sito su due (es. fuoriuscita in superficie o daylighting). La presenza del reagente in piezometri è stata rilevata in ~70% dei casi, spesso gestibile senza interventi oppure con semplici spiazzamenti con acqua o spurghi low-flow dopo alcune settimane. La regolazione di pressioni/portate, della diluizione e del volume, nonché la ripianificazione delle sequenze di iniezione e della spaziatura, si sono dimostrate efficaci per prevenire o risolvere le criticità.

Risultati, tempistiche e stabilità

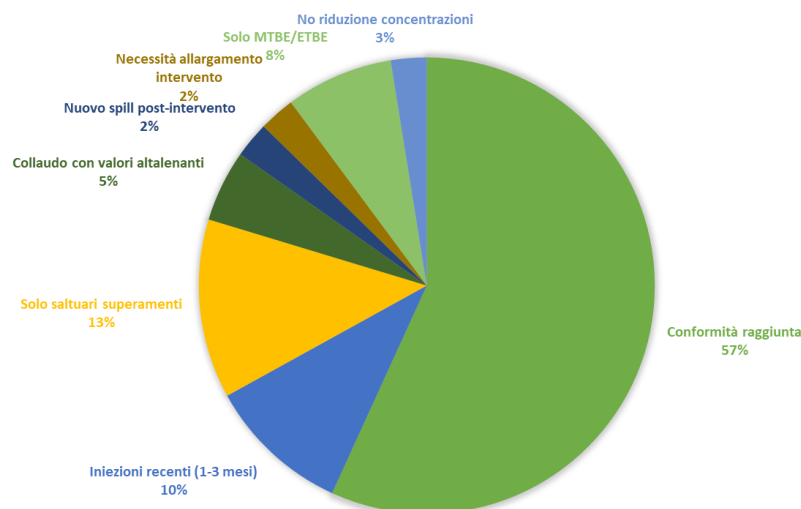


Figura 3. Distribuzione percentuale dei 50 siti trattati con PetroFix® in base al raggiungimento della conformità e alle principali casistiche residue

La conformità è stata raggiunta nel ~56–57% dei siti, con monitoraggi che mostrano abbattimenti rapidi e stabilità nel tempo. Del restante 43%: nel 10% dei casi il monitoraggio è troppo recente per valutare l'efficacia, nel 13% si osserva una riduzione delle concentrazioni con solo sporadici superamenti dei limiti e nel 5% sono in corso collaudi con dati ancora altalenanti. Alcune situazioni particolari, come nuovi eventi di contaminazione o la necessità di ampliare l'intervento, non sono attribuibili all'efficienza del prodotto. Infine, solo una piccola percentuale di siti mostra difficoltà nel ridurre le concentrazioni, soprattutto quando la contaminazione è dovuta a MTBE/ETBE, composti notoriamente più difficili da trattare con questa tecnologia.

CASI DI STUDIO

Negli ultimi anni, l'applicazione del carbone attivo colloidale (CAC) per la bonifica in situ di siti contaminati da idrocarburi ha trovato crescente diffusione in Italia, grazie alla sua efficacia e versatilità in contesti operativi anche molto complessi. Questa tecnologia si è dimostrata particolarmente adatta sia per la gestione di contaminazioni in aree sorgente che per il contenimento e la riduzione dei plume, offrendo soluzioni rapide e stabili anche in presenza di vincoli logistici, elevata variabilità litologica e differenti tipologie di contaminanti.

Vengono illustrati tre casi studio rappresentativi, scelti per illustrare la varietà di contesti applicativi, le diverse configurazioni adottate e i risultati ottenuti, con particolare attenzione agli aspetti operativi e alle evidenze emerse dal monitoraggio post-intervento.

Caso studio 1 – Intervento in scavo e su plume (HC, BTEX, eteri)

In questo primo caso, l'intervento è stato realizzato su un ex punto vendita carburanti situato in area urbana, caratterizzato da una falda superficiale a circa 2–2,5 metri dal piano campagna. Il sito presentava una contaminazione complessa: nei terreni erano presenti idrocarburi sia a catena corta che lunga (HC <12 e >12), BTEX e piombo tetraetile, mentre nelle acque sotterranee si rilevavano idrocarburi totali, BTEX e composti ossigenati come MTBE ed ETBE.



Figura 4. Attività di campo caso 1 - Applicazione di PetroFix a fondo scavo.

L'approccio adottato ha previsto una prima fase di applicazione del carbone attivo colloidale direttamente in scavo, su un'area di circa 300 m², utilizzando 810 kg di prodotto diluiti in 8.000 litri di miscela. Successivamente, per il trattamento del plume residuo, è stata realizzata una griglia di 25 punti direct-push, con circa 100 kg di prodotto e 1.000 litri di miscela per ciascun punto. I risultati hanno evidenziato un abbattimento rapido delle concentrazioni nelle acque, con raggiungimento della conformità ai limiti normativi, mentre per i terreni superficiali il collaudo è al momento attuale in corso.

Caso studio 2 – Area di servizio autostradale con falda superficiale

Il secondo caso riguarda un'area di servizio autostradale situata in contesto collinare, caratterizzata dalla presenza di una falda molto superficiale (0,5–1,5 m dal piano campagna) e da una stratigrafia eterogenea, con alternanza di terreni fini e grossolani. In passato, sul sito erano già stati effettuati diversi interventi di bonifica, tra cui pump & treat, bioslurping e l'utilizzo di tensioattivi. L'intervento con carbone attivo colloidale ha previsto la realizzazione di una barriera reattiva sul plume, mediante l'installazione di 18 tubi valvolati, ciascuno trattato con circa 272 kg di prodotto e 2.500 litri di miscela. L'applicazione è stata eseguita nel novembre 2024. Il monitoraggio, attualmente in corso da 12 mesi, ha già evidenziato il raggiungimento degli obiettivi di bonifica nei piezometri interessati dall'intervento.

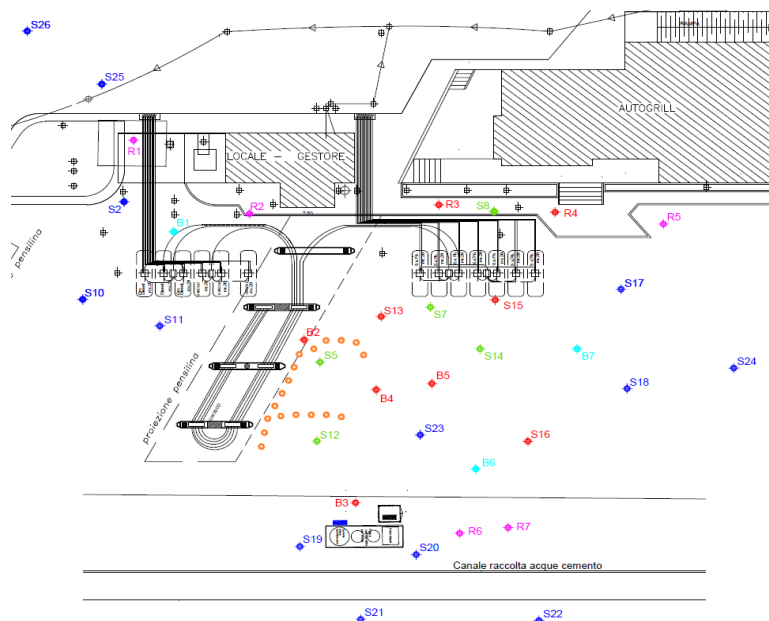


Figura 5. Planimetria della stazione di servizio. In arancione sono indicati i punti di iniezione PetroFix con configurazione a barriera.

Caso studio 3 – Punto vendita attivo con elevate concentrazioni

Il terzo caso studio si riferisce a un punto vendita carburanti ancora attivo, situato in area residenziale, dove la falda si trova a circa 2 metri di profondità. In questo sito, le acque sotterranee presentavano concentrazioni particolarmente elevate di idrocarburi totali (fino a 330.000 µg/L), BTEX (fino a 15.800 µg/L) e MTBE (fino a 520 µg/L). In passato erano già stati effettuati interventi di pump & treat. La strategia di bonifica ha previsto la realizzazione di una doppia barriera, sia sulla sorgente sia sul plume, utilizzando aste valvolate: 10 punti sulla sorgente e 9 sul plume.

Le attività si sono svolte tra aprile e settembre 2024. I risultati mostrano che i piezometri interni all'area trattata hanno raggiunto la conformità ai valori obiettivo (CSR) e i punti di controllo esterni (POC) hanno raggiunto la conformità ai valori tabellari (CSC).

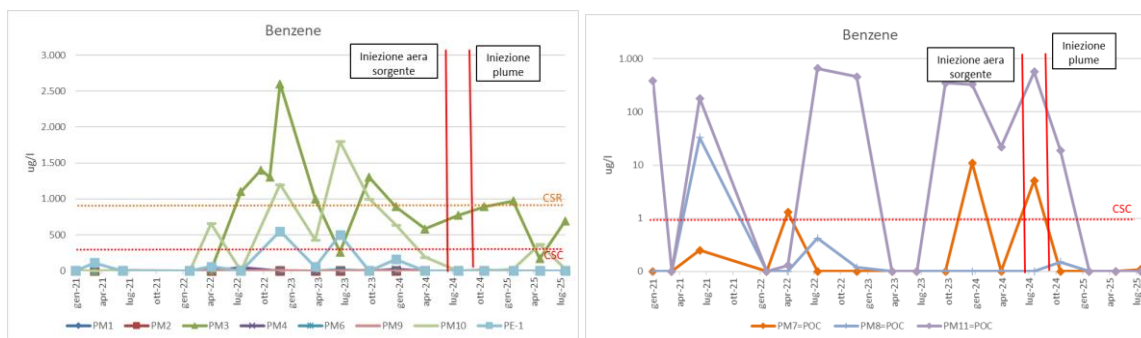


Figura 6. Andamento del parametro benzene pre e post- iniezione. A sinistra: piezometri interni al sito, obiettivo CSR. A destra: piezometri di controllo esterni, obiettivo CSC.

CONCLUSIONI

L'utilizzo del carbone attivo colloidale in approccio ISSB ha rivoluzionato la gestione di siti con contaminazioni da idrocarburi, in particolare punti vendita carburanti caratterizzati da logistica complessa e molteplici vie preferenziali. La semplicità di impiego, la non pericolosità/corrosività, la versatilità di installazione e la longevità del trattamento, unite alla rapidità e stabilità dei risultati, rendono PetroFix un valido strumento anche in sinergia con altre tecnologie. Le evidenze statistiche e i numerosi casi studio italiani confermano una percentuale significativa di conformità in tempi mediamente rapidi e un'elevata robustezza operativa, a fronte di criticità gestibili con buone pratiche di campo.

BIBLIOGRAFIA

Vogt C., Kleinstaub S., Richnow H.-H. (2011). Anaerobic benzene degradation by bacteria. *Microbial Biotechnologies*, 4, 710–724.

Gieg L. M., Fowler S. J., Berdugo-Clavijo C. (2014). Syntrophic biodegradation of hydrocarbon contaminants. *Curr. Opin. Biotechnol.*, 27, 21–29.