

Polo Chimico Multisocietario di Castellanza - Olgiate Olona (VA)

Progetto di MISO - Matrice Acque di Falda

Febbraio 2009



www.erm.com

Delivering sustainable solutions in a more competitive world



Chemisol Italia S.r.l.

Polo Chimico Multisocietario di
Castellanza - Olgiate Olona (VA):
*Progetto di MISO Matrice Acque di
Falda*

26 febbraio 2009

Rif. 0096947

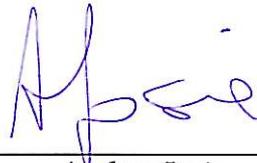
Preparato da: Aurora Finiguerra, Clelia Scaramella,
Chiara Aquino, Mattia Zaffaroni, Michele Remonti, Monica
Carina Vaccaro, Paolo Renoldi

Revisione: Andrea Iosia, Piero Mori

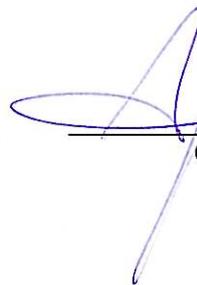
Questo documento è stato preparato da Environmental Resources Management, il nome commerciale di ERM Italia S.p.A., con la necessaria competenza, attenzione e diligenza secondo i termini del contratto stipulato con il Cliente e le nostre condizioni generali di fornitura, utilizzando le risorse concordate.

ERM Italia declina ogni responsabilità verso il Cliente o verso terzi per ogni questione non attinente a quanto sopra esposto.

Questo documento è riservato al Cliente. ERM Italia non si assume alcuna responsabilità nei confronti di terzi che vengano a conoscenza di questo documento o di parte di esso.



Andrea Iosia
Project Director



Chiara Aquino
Project Manager

INDICE

1	INTRODUZIONE	1
1.1	SCOPO DEL LAVORO	1
1.2	SINTESI DELL'ITER PROCEDURALE E LEGISLAZIONE DI RIFERIMENTO	1
1.3	BREVE SINTESI DEI LAVORI	3
1.4	CONTENUTO DEL DOCUMENTO	4
2	CONSIDERAZIONI SULLO STATO QUALITATIVO DELLE ACQUE SOTTERRANEE ED INTERPRETAZIONE DEI DATI IDROCHIMICI	6
2.1	PREMESSA	6
2.2	ANALISI DELLE COMPONENTI PRINCIPALI	7
2.3	CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE DA FERRO IN FALDA	13
2.4	CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE DA ARSENICO IN FALDA	23
2.5	CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE DA MANGANESE IN FALDA	29
2.6	NOTE SULLA PRESENZA DI ALTRI COMPOSTI D'INTERESSE NELLE ACQUE DI FALDA	36
2.7	CONCLUSIONI	36
3	SINTESI DEI DATI IDROGEOLOGICI	38
3.1	RISULTATI DELLE PROVE LEFRANC	38
3.2	CAMPO PROVE BARRIERA IDRAULICA	39
3.3	RISULTATI DELLE PROVE DI POMPAGGIO	40
3.4	CARATTERISTICHE CHIMICHE DELLE ACQUE DI EMUNGIMENTO	46
3.5	MODELLO CONCETTUALE IDROGEOLOGICO	47
4	PROGETTAZIONE DELLA BARRIERA IDRAULICA	49
4.1	CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLA BARRIERA IDRAULICA	49
4.2	MODELLO DI FLUSSO PER IL DIMENSIONAMENTO DEL SISTEMA DI CONTENIMENTO IDRAULICO	49
4.3	UBICAZIONE POZZI E DIMENSIONAMENTO PORTATE	53
4.4	STRATIGRAFIA PRESUNTA	54
4.5	CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE POZZI	54
4.6	CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE IMPIANTO DI SOLLEVAMENTO	55
4.7	INDICAZIONI DI MASSIMA SULL'IMPIANTO DI REGOLAZIONE DI PORTATA	56
4.8	CRITERI DI GESTIONE DELLE ACQUE	57
4.9	GESTIONE DEL TERRENO DI RISULTA DELLA PERFORAZIONE	59
4.10	RILIEVO PLANOALTIMETRICO	60
4.11	AVVIAMENTO DEL SISTEMA DI CONTENIMENTO IDRAULICO	61
4.12	RAPPORTO DI AVVIAMENTO	61
4.13	COMPUTO METRICO ESTIMATIVO - BARRIERA IDRAULICA	61
4.14	CRONOPROGRAMMA DEGLI INTERVENTI	63
4.15	MISURE DI SICUREZZA NEL CANTIERE DI PERFORAZIONE	63
5	PROGETTAZIONE TRATTAMENTO DI AIR SPARGING	65

5.1	<i>GENERALITÀ</i>	65
5.2	<i>DESCRIZIONE DEL PROCESSO</i>	66
5.3	<i>APPLICABILITÀ DEL METODO</i>	67
5.4	<i>PROCESSI A CARICO DEI CONTAMINANTI</i>	68
5.5	<i>EFFETTI FISICI SULL'ACQUIFERO</i>	69
5.6	<i>CRITERI GENERALI DI PROGETTAZIONE</i>	70
5.7	<i>CARATTERISTICHE SITO-SPECIFICHE DELL'ACQUIFERO E DELLA CONTAMINAZIONE</i>	72
5.8	<i>COSTITUENTI DEL SISTEMA DI AIR SPARGING</i>	73
5.9	<i>CAMPO PROVA</i>	75
5.10	<i>CARATTERISTICHE IMPIANTO FULL-SCALE</i>	77
5.11	<i>COMPUTO METRICO ESTIMATIVO</i>	77
5.12	<i>CRONOPROGRAMMA DEGLI INTERVENTI</i>	78
6	<i>PIANO DI MONITORAGGIO DELLA FALDA</i>	79
6.1	<i>PIEZOMETRI INTERNI ALLO STABILIMENTO</i>	79
6.2	<i>PIEZOMETRI ESTERNI ALLO STABILIMENTO</i>	81
7	<i>MISURE DI PREVENZIONE A TUTELA DELLE ACQUE DI FALDA</i>	83

1 INTRODUZIONE

1.1 SCOPO DEL LAVORO

Il presente documento è stato preparato da *Environmental Resources Management (ERM Italia S.p.A.)* per conto di *Chemisol Italia S.r.l.* (in seguito indicata come *Chemisol*).

Chemisol Italia S.r.l. è la nuova denominazione sociale della società *AMI – Agrolinz Melamine International Italia S.r.l.*, della quale mantiene la medesima partita IVA.

Chemisol sostituisce pertanto *AMI* nel procedimento di gestione della contaminazione ex DM471/99-Dlgs.152/06 delle aree di precedente proprietà *AMI*.

La presente relazione rappresenta il Progetto di Messa in Sicurezza Operativa della matrice acque di falda per il Polo Chimico multisocietario di Castellanza e Olgiate Olona (VA), noto anche come Polo Chimico ex Montedison, in osservanza a quanto previsto dall'Allegato 2 Titolo V del D. Lgs. 152/06 ed alle prescrizioni della Conferenza dei Servizi del 22/10/2008.

La progettazione degli interventi, si è basata sui dati acquisiti in sede di indagini di caratterizzazione (cfr. *Piano della Caratterizzazione Aree di Proprietà AMI: Polo Chimico ex-Montedison di Castellanza e Olgiate Olona (VA) ed Aree Limitrofe (ERM, Luglio 2007)* e *Rapporto di Caratterizzazione delle Aree AMI Interne e Limitrofe al Polo Chimico di Castellanza – Olgiate Olona (ERM, Giugno 2008)* e sugli esiti del Campo Prove condotto da ERM nel periodo Luglio-Ottobre 2008 (cfr. § 3.2).

1.2 SINTESI DELL'ITER PROCEDURALE E LEGISLAZIONE DI RIFERIMENTO

In data 29/03/2001 la società *Agrolinz Melamine Italia S.r.l.* (oggi *Agrolinz Melamine International Italia S.r.l.*) comunicava ai sensi dell'art. 17, comma 13bis, del D.Lgs 22/1997 e dell'art. 9, comma 3, del D.M. 471/99, la presenza di una situazione contaminazione del suolo causata da pregresse attività industriali svolte nel medesimo sito ad opera di altri soggetti, con possibile superamento dei limiti di concentrazione accettabili per alcuni dei parametri di cui all'allegato 1 del D.M. 471/1999 (cfr. *Allegato B*).

Il 29.04.2006 entrava in vigore il D. Lgs. 152/2006, che costituisce l'attuale riferimento normativo per l'articolazione delle procedure previste nel presente documento.

In data 21.03.2007 *AMI* ha presentato il Piano di Caratterizzazione dell'area denominata "Area B in Zona A", ai sensi dell'art. 242, comma 11, e dell'art. 245, comma 2, del D. Lgs. 152/2006. Tale Piano di Caratterizzazione è stato approvato in sede di Conferenza dei Servizi del 11.05.2007 ed autorizzato con Decreto della Regione Lombardia n. 5297 del 22.05.2007. Nel Giugno 2007

sono state effettuate le relative Indagini del Piano di Caratterizzazione, di concerto con gli Enti competenti.

In data 25.07.2007 AMI ha presentato Piano di Caratterizzazione, ai sensi dell'art. 242, comma 11, e dell'art. 245, comma 2, del D. Lgs. 152/2006, delle aree di proprietà AMI - *Agrolinz Melamine International Italia S.r.l.* entro il Polo Chimico ex-Montedison di Castellanza ed Olgiate Olona e le aree di proprietà AMI limitrofe al Polo Chimico medesimo, con l'esclusione della sola "Area B in Zona A" che, come sopra riportato, è oggetto di uno specifico procedimento.

In data 11/09/2007 si è tenuto un Tavolo Tecnico presso la Provincia di Varese (presenti AMI, ARPA Varese, Provincia di Varese, Comune di Castellanza e Comune di Olgiate Olona) finalizzato alla valutazione preliminare del PdC.

In data 25/09/2007 si è tenuto un sopralluogo presso il sito (presenti AMI, ARPA Varese e Provincia di Varese) finalizzato all'analisi del Piano d'Indagine proposto e alla verifica in campo di alcune richieste di integrazione formulate dagli Enti.

In data 03/10/2007 presso la Regione Lombardia si è tenuta la Conferenza dei Servizi che ha approvato il PdC presentato. L'autorizzazione all'attuazione del PdC è stata formalizzata con D.d.u.o. 16/10/2007 n. 11868, pubblicata sul Bollettino Ufficiale della Regione Lombardia n.45 del 05/11/2007.

In data 24/10/07 AMI comunicava l'esecuzione di un primo stralcio di indagini nell'ambito dell'area di pertinenza della Centrale Termoelettrica (Zona A di stabilimento) condotto tra il 25/10/07 ed il 26/10/07.

AMI, previo coordinamento con le Autorità di Controllo, ha comunicato con nota del 25/01/2008 l'avvio delle attività d'indagine presso il sito, fornendo successivamente un report settimanale dello stato di avanzamento delle indagini condotte di concerto con gli Organi competenti. La fine delle attività di campo è stata comunicata da AMI con nota del 05/03/2008.

In data 01/04/08 si teneva presso la Provincia di Varese, presenti ARPA Varese, Provincia di Varese ed ERM come consulente tecnico di AMI, un incontro informale per la condivisione preliminare dei criteri d'impostazione dell'Analisi di Rischio Sito-Specifica.

In data 16/06/2008 AMI trasmetteva alle Autorità di Controllo il *Rapporto di Caratterizzazione delle Aree AMI Interne e Limitrofe al Polo Chimico di Castellanza – Olgiate Olona (ERM, Giugno 2008) e l'Analisi di Rischio Sito-Specifica delle Aree AMI Interne al Polo Chimico di Castellanza – Olgiate Olona (ERM, Giugno 2008)*.

Tra Luglio e Ottobre 2008 ERM ha effettuato, per conto di AMI, un Campo Prove (cfr. § 3.2), finalizzato all'acquisizione dei parametri idrogeologici utili

per il dimensionamento di un'opera di confinamento idrodinamico mediante installazione di pozzi di emungimento delle acque di falda.

In data 22/10/2008 si è tenuta la Conferenza dei Servizi finalizzata alla valutazione del Rapporto di Caratterizzazione e dell'Analisi di Rischio presentate da AMI nel giugno 2008. Con riferimento al relativo verbale, la Conferenza dei Servizi ha validato il *Rapporto di Caratterizzazione delle Aree AMI Interne e Limitrofe al Polo Chimico di Castellanza – Olgiate Olona (ERM, Giugno 2008)*, sospendendo l'approvazione dell'*Analisi di Rischio Sito-Specifica delle Aree AMI Interne al Polo Chimico di Castellanza – Olgiate Olona (ERM, Giugno 2008)*. Tale sospensione veniva motivata dalla necessità di acquisire ulteriori elementi di valutazione (dati relativi alle aree di proprietà di terzi ricadenti nel Polo Chimico multi societario oltre a pareri ufficiali inerenti alcuni composti chimici d'interesse).

La Conferenza dei Servizi prescriveva inoltre la presentazione entro il 22/01/09 di un progetto per la realizzazione di una barriera idraulica, a presidio del sedime industriale, come intervento di Messa in Sicurezza Operativa del sito.

Inoltre in tale sede ufficiale veniva sancita la riunificazione del procedimento tecnico-amministrativo avviato ai fini della caratterizzazione dell'Area B in Zona A con quello relativo alla caratterizzazione dell'intera area di proprietà di AMI.

In data 15/12/08, AMI trasmetteva alla Regione Lombardia una richiesta di proroga di 40 giorni (al 02/03/09) per la presentazione del presente Progetto di Messa in Sicurezza Operativa della matrice acque di falda per il Polo Chimico multisocietario di Castellanza e Olgiate Olona.

In data 02/02/2009 AMI Italia S.r.l., acquisita dalla società Borgo Olona S.r.l., cambiava contestualmente denominazione sociale in *Chemisol Italia S.r.l.*

1.3

BREVE SINTESI DEI LAVORI

Il presente documento progettuale è stato redatto sulla base di un'analisi mirata dello stato qualitativo delle acque di falda presso il Polo Chimico multi societario di Castellanza-Olgiate Olona, basata sugli esiti dei monitoraggi idrochimici condotti dal marzo 2007 all'ottobre 2008.

Tale rivisitazione ed analisi dei dati acquisiti durante le varie fasi d'indagine e dei meccanismi di diffusione e trasporto dei contaminanti riscontrati nelle acque di falda presso l'area di studio (cfr. § 2) ha consentito di definire alcune ipotesi di intervento volte a mettere in sicurezza la matrice acqua di falda (con particolare riferimento al riscontro di Arsenico in concentrazioni superiori alla CSC di legge) e di favorire fenomeni di precipitazione di metalli presenti nel sottosuolo (cfr. §2.5).

Tale approccio ha portato ad individuare due distinte modalità di intervento, da attuarsi in aree diverse del sedime industriale e finalizzate alla gestione di

superamenti delle CSC per sostanze differenti (cfr. § 4 e § 5). In particolare, le modalità di intervento individuate sono:

- il confinamento idraulico nella porzione Sud-Occidentale di stabilimento (area impattata da superamenti delle CSC per Arsenico nelle acque di falda);
- un trattamento di *Air Sparging* nella porzione Orientale di stabilimento (settori interessati da superamenti delle CSC per Manganese nelle acque di falda), al fine di ripristinare condizioni idrochimiche dell'acquifero (ossigenazione, potenziale redox) che determinino la precipitazione degli ossidi di Manganese contenuti nel sottosuolo; tale intervento viene sviluppato nel presente documento includendo il programma delle prove da condurre nell'ambito di uno specifico Test Pilota, da effettuare in corso d'opera.

Relativamente all'implementazione di una Progetto di Barriera Idraulica (cfr. § 4), ci si è rifatti in particolar modo agli esiti delle prove condotte sul pozzo pilota PW1 e sui piezometri di monitoraggio limitrofi, nell'ambito del Campo Prove di cui al § 3.

Il presente documento include inoltre il piano di monitoraggio delle acque di falda nelle aree poste a valle del polo chimico multi societario (cfr. § 6) e l'individuazione di misure temporanee di prevenzione a tutela della matrice acque di falda (cfr. § 7), la cui implementazione è in corso a cura di *Chemisol*.

1.4

CONTENUTO DEL DOCUMENTO

Il presente documento è strutturato come segue:

- Capitolo 1: Introduzione;
- Capitolo 2: Considerazioni sullo Stato Qualitativo delle Acque di Falda (riprende gli esiti del complesso delle indagini effettuate con riferimento alla matrice acque di falda, fornendo un'interpretazione dei meccanismi di diffusione e trasporto dei contaminanti rilevati, al fine di definire possibili origini e modalità di intervento e gestione delle non conformità rilevate);
- Capitolo 3: Sintesi dei Dati Idrogeologici (descrive le attività eseguite nel Campo Prove Barriera Idraulica e definisce il Modello Concettuale Idrogeologico);
- Capitolo 4: Progettazione della Barriera Idraulica;
- Capitolo 5: Progettazione del Trattamento di Air Sparging (include le caratteristiche di massima dell'impianto e la definizione del programma di test pilota);
- Capitolo 6: Piano di Monitoraggio della Falda (descrive i protocolli da adottare, a seguito della realizzazione degli interventi, per la verifica ed il monitoraggio dello stato qualitativo delle acque di falda; include sia un piano di monitoraggio per i piezometri interni al sito, sia un piano di monitoraggio per i piezometri esterni al sito);
- Capitolo 7: Misure di Prevenzione a tutela delle acque di falda (riporta gli interventi in corso per la Messa in Sicurezza del sito mediante i pozzi/piezometri attualmente disponibili a valle del sedime industriale);

- Capitolo 8: Conclusioni (riporta la sintesi degli esiti delle attività effettuate e delle azioni proposte).

In allegato al testo è inoltre riportata la seguente documentazione:

Allegato A: Figure

- *Figura 1 – Ubicazione Piezometri di Stabilimento*
- *Figura 2 – Mappa delle Linee di Isoconcentrazione di Arsenico nelle Acque di Falda*
- *Figura 3 – Mappa delle Linee di Isoconcentrazione di Manganese nelle Acque di Falda*
- *Figura 4 – Mappa delle Linee di Isoconcentrazione di Ferro nelle Acque di Falda*
- *Figura 5 – Mappa delle Linee di Isoconcentrazione di Pentaeritrite nelle Acque di Falda*
- *Figura 6 – Mappa delle Linee di Isoconcentrazione di Formaldeide nelle Acque di Falda*
- *Figura 7 – Mappa delle Linee di Isoconcentrazione di Acetaldeide nelle Acque di Falda*
- *Figura 8 – Mappa delle Linee di Isoconcentrazione di Melamina nelle Acque di Falda*
- *Figura 9 – Mappa delle Linee di Isoconcentrazione di Ossigeno Disciolto nelle Acque di Falda*
- *Figura 10 – Mappa delle Linee di Isoconcentrazione di Potenziale Redox nelle Acque di Falda*
- *Figura 11 – Sezioni Idrogeologiche*
- *Figura 12 – Simulazione Piezometria Statica*
- *Figura 13 – Simulazione Piezometria Dinamica*
- *Figura 14 – Ubicazione Pozzi Barriera*
- *Figura 15 – Schema Tipo Pozzo Barriera*
- *Figura 16 – Ubicazione Impianto Pilota e Full Scale di Air Sparging*
- *Figura 17 – Schema Tipo Sistema Air Sparging*

Allegato B: Campo Prove – Report di Campo

- *B1 - Stratigrafie*
- *B2 - Prove LeFranc*

Allegato C: Campo Prove - Risultati Analitici del Terreno

Allegato D: Campo Prove - Risultati Analitici delle Acque di Falda

Allegato E: Campo Prove – Prove di Portata

- *E1 – Prova di pompaggio a gradini*
- *E2 - Prova di pompaggio a portata costante*

Allegato F: Dati Input e Output dell'Analisi delle Componenti Principali

Allegato G: Atti Amministrativi e Comunicazioni con Enti

Allegato H: Cronoprogramma Attività d'Installazione della Barriera Idraulica

2.1**PREMESSA**

Il presente paragrafo prende in esame i dati acquisiti nel corso delle campagne di monitoraggio idrochimico delle acque di falda condotte presso il Sito a partire dal Marzo 2007. La finalità di tale revisione organica è di identificare possibili meccanismi di contaminazione delle acque sotterranee, anche con riferimento allo stato chimico-fisico dell'acquifero e ai dati acquisiti relativamente al suolo e sottosuolo ed a materiali di origine antropica riscontrati in corso d'indagine.

Le attività di indagine nell'area di studio hanno consentito di riscontrare per le acque di falda alcuni superamenti delle CSC per Arsenico, Ferro e Manganese. Tali superamenti risultano collocati, a grande scala, in settori geografici ampiamente sovrapponibili dello stabilimento (settore Centro-Occidentale della Zona A e porzione Sud-Occidentale della Zona B).

Relativamente alle caratteristiche chimico-fisiche delle acque di falda, si rileva che:

- la concentrazione di Ossigeno disciolto nelle acque di falda si riduce progressivamente da monte a valle del sito con una riduzione da una concentrazione superiore ai 5 mg/l a monte fino a valori prossimi a 0,2 mg/l nella porzione meridionale di sito;
- il potenziale redox (Eh) è mediamente prossimo ai 150 mV e scende a valori negativi in corrispondenza di alcuni piezometri di monitoraggio collocati presso la Zona A di stabilimento;
- si riscontra un aumento della temperatura delle acque di falda dal settore di monte a quello di valle del sito, con incrementi di temperatura anche superiori a 5°C e talora prossimi ai 10°C. Tale aumento di temperatura si ha prevalentemente nelle zone A e B dello stabilimento, in particolare nei settori Centro-Occidentali di queste.

Con riferimento alle indagini condotte sulla matrice suolo e sottosuolo ed all'identificazione della presenza di materiali di riporto in zona A, preliminarmente ricondotti a depositi "storici" di ceneri di pirite (cfr. *Rapporto di Caratterizzazione delle Aree AMI Interne e Limitrofe al Polo Chimico di Castellanza – Olgiate Olona (ERM, Giugno 2008)*), si evidenzia come, finora, la presenza di superamenti della CSC per Arsenico nelle acque di falda sia stata tendenzialmente ricondotta a fenomeni di lisciviazione e trasporto di ossidi di Arsenico, contenuti in tracce in tali depositi, la cui distribuzione interessa la porzione centrale della zona A di stabilimento (per quanto attiene le aree di proprietà *Chemisol*). Tali depositi non sono mai stati ritrovati nelle zone B, C e D di stabilimento (né ragionevolmente potrebbero trovarvisi dato che la produzione di tali rifiuti è cessata circa 10 anni prima che lo stabilimento si

sviluppassse verso i settori settentrionali del Polo Chimico, posti a Nord dell'asse stradale del Sempione).

I dati chimici relativi alle campagne di indagine sulla matrice acqua di falda condotte nel 2007 e nel 2008 sono stati oggetto di un'articolata analisi, descritta nel presente capitolo, che ha permesso di chiarire i probabili processi di natura chimico-fisica e microbiologica in atto nella falda al di sotto del sito.

Per prima cosa è stato applicato un metodo statistico denominato Analisi delle Componenti Principali (*PCA*), descritto al § 2.2, che ha consentito di eseguire un primo *screening* dei dati disponibili, di evidenziare le correlazioni esistenti tra le sostanze analizzate e di giungere ad una definizione preliminare dei possibili processi chimici e degradativi in atto. Successivamente è stata eseguita un'analisi di dettaglio con metodi più tradizionali (grafici bivariati, analisi delle distribuzioni spaziali), che hanno confermato le ipotesi preliminari derivanti dalla *PCA* e hanno permesso di completare il quadro conoscitivo.

A seguito dell'analisi effettuata è risultato che una relazione diretta causa-effetto tra la presenza di ceneri di pirite e il riscontro di elevate concentrazioni di Arsenico in falda, seppur possibile, non è sufficiente per spiegare né la presenza di elevate concentrazioni di Arsenico in falda anche in aree diverse (non a valle dalle aree con presenza di ceneri di pirite), né fornisce una giustificazione alle anomalie nella distribuzione di Ossigeno disciolto, Potenziale Redox e Temperatura.

I seguenti paragrafi illustrano l'analisi e le considerazioni effettuate con riferimento agli elementi sopra esposti.

2.2

ANALISI DELLE COMPONENTI PRINCIPALI

L'Analisi delle Componenti Principali (*Principal Components Analysis - PCA*) è una tecnica per la semplificazione dei dati utilizzata nell'ambito della statistica multivariata. Lo scopo di questa tecnica è la riduzione del numero delle variabili di un data-set (nel nostro caso le concentrazioni degli analiti in acqua di falda) ad un numero inferiore di variabili latenti, denominate appunto Componenti Principali ⁽¹⁾.

L'utilizzo di poche Componenti Principali (da 2 a 4 in genere) invece delle numerose variabili originarie (nel nostro caso i 12 analiti presi in esame relativamente alle acque di falda) rende molto più semplice l'analisi dei dati, ma costringe a perdere parte dell'informazione contenuta nei dati originari (in gergo statistico si dice che la *varianza spiegata* dalle componenti principali analizzate è inferiore alla *varianza totale* dei dati).

(1) Una trattazione di dettaglio di questo metodo è contenuta nel libro Todeschini R., 2003. *Introduzione alla chemiometria*. Edises

I benefici nella comprensibilità dei dati sono così evidenti, però, che rendono in genere accettabile questa perdita di informazione, che si ha solo nella fase iniziale di *screening* costituita dalla PCA.

L'utilizzo delle Componenti Principali nell'ambito dell'analisi idrochimica dei siti contaminati permette, quindi, di semplificare notevolmente la comprensione del modello concettuale, individuando con facilità le relazioni esistenti tra le varie sostanze chimiche presenti in falda.

In buona sostanza, prima di analizzare singolarmente i grafici delle numerose sostanze chimiche ricercate, operazione spesso lunga e complessa, si analizzano i cosiddetti "grafici dei *Loadings*", che derivano dall'applicazione del metodo, dove appaiono evidenti le correlazioni tra le varie sostanze. Ciò permette di ipotizzare i possibili rapporti di causa-effetto tra le varie sostanze basandosi su evidenze oggettive di natura numerica e statistica e non soggettive, come quelle che si possono ad esempio dedurre confrontando qualitativamente la forma dei pennacchi delle varie sostanze in falda.

Quest'analisi qualitativa è tuttavia molto utile, ma la sua esecuzione dopo questa fase preliminare di *screening* permette di evitare errori e costituisce un utile riferimento non dipendente dall'"occhio" dell'osservatore.

2.2.1 *Approccio*

I dati relativi ai parametri chimici e chimico-fisici delle acque di falda misurati nelle campagne del 2007 e del 2008 presso il sito sono stati sottoposti ad un'analisi statistica denominata Analisi delle Componenti Principali (PCA) utilizzando il *software XLStat 7.1* al fine di verificare le correlazioni esistenti tra i parametri monitorati e eseguire un primo *screening* relativo ai possibili rapporti di causa-effetto alla base dei valori misurati dei parametri.

La PCA consente di ridurre il numero di variabili utilizzate per descrivere il sistema e quindi di semplificare notevolmente l'analisi dei dati. Attraverso la PCA è possibile riconoscere dei gruppi di variabili fra loro correlate e dei gruppi di campioni aventi caratteristiche simili.

Nel caso specifico sono stati analizzati i seguenti parametri: Arsenico, Ferro, Manganese, Idrocarburi Totali, Potenziale Redox, pH, Temperatura, concentrazione di Ossigeno disciolto, Melamina, Pentaeritrite, Formaldeide e Acetaldeide. Tali parametri sono stati ritenuti più interessanti perché aventi concentrazioni superiori alle CSC per la falda, oppure perché indicatori della presenza di processi biodegradativi, oppure perché sostanze organiche associabili all'attività svolta presso il sito.

2.2.2 *Metodologia*

La PCA è una tecnica statistica di analisi multivariata che consiste nel sostituire le variabili originarie del data-set (nel nostro caso Arsenico, Ossigeno disciolto, etc.) con le componenti principali (PC) del sistema, che

sono una combinazione lineare delle variabili originarie. Denominando PC_i l' i -esima componente principale e V_1, V_2, \dots, V_n le n variabili originarie, si ha che:

$$PC_i = a V_1 + b V_2 + \dots + n V_n$$

La *PCA* consiste in una rotazione del data-set originario nelle direzioni di massima varianza assunte dal sistema. La prima componente principale (*PC1*) è orientata nella direzione di massima varianza, la *PC2* è ortogonale a *PC1* e orientata nella direzione ove la varianza residua è massima, e così via. I punti del data set originario vengono quindi rappresentati nel nuovo sistema di riferimento, i cui assi ortogonali sono le componenti principali. Il calcolo delle *PC* consiste nella stima dei coefficienti moltiplicativi a, b, \dots, n di ciascuna componente principale.

Con il metodo vengono calcolate tante *PC* quante sono le variabili originarie, ma, dato che la frazione di varianza spiegata da ciascuna *PC* decresce dalla prima all'ultima *PC*, in genere sono sufficienti solo le prime *PC* per descrivere i dati, cioè quelle a cui è associata la percentuale più elevata della varianza dei dati. Il metodo consente quindi di ridurre il numero di variabili utilizzate per descrivere il sistema e quindi di semplificare notevolmente l'analisi dei dati.

Mediante la *PCA* è possibile eseguire una classificazione (in inglese cluster analysis) sia sulle variabili originarie che sui campioni, cioè di riconoscere dei gruppi di variabili fra loro correlate e dei gruppi di campioni aventi caratteristiche simili.

Prima di eseguire la *PCA* i dati originari sono stati scalati sottraendo a ciascuna misura il valore minimo assunto dalla variabile considerata (per esempio la temperatura) e dividendo il risultato per la differenza tra il valore minimo e massimo assunto dalla variabile. Le variabili scalate con questo metodo assumono valori compresi tra 0 e 1 e in tal modo si annullano gli effetti dovuti alla differenza nel valore assoluto di ciascuna variabile. In pratica si considerano solo le variazioni relative o percentuali nel valore delle variabili tra i diversi campioni e non le variazioni assolute. Trattamenti preliminari dei dati come quello descritto sono utilizzati molto frequentemente nell'analisi statistica multivariata.

2.2.3 Risultati

La tabella seguente mostra la frazione della varianza totale spiegata dalle 12 componenti principali calcolate a partire dalle 12 variabili originali scalate utilizzate nell'analisi:

Tabella 2.1 Percentuale di varianza spiegata

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10	PC11	PC12
V %	29.1	14.4	13.2	9.8	8.5	7.7	5.6	4.2	3.7	2.0	1.5	0.4
V_c %	29.1	43.5	56.7	66.5	75.0	82.7	88.3	92.5	96.2	98.2	99.6	100.0

V % = percentuale di varianza spiegata

V_c % = percentuale di varianza cumulativa spiegata

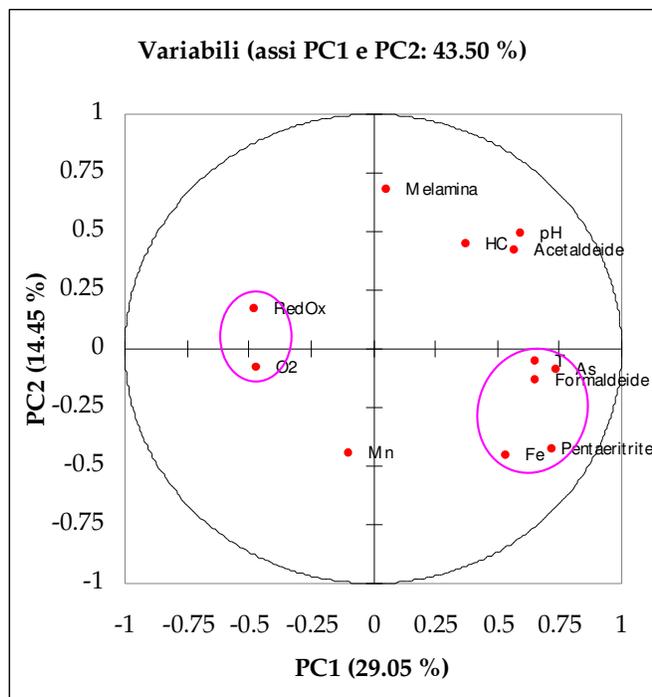
Si può osservare che il valore della varianza spiegata dalla prima componente principale è quasi pari al 30% del totale e che il valore cumulato per le prime tre PC è pari a oltre il 66%. Ciò significa che, sostituendo alle 12 variabili originarie le prime quattro PC si perde circa il 34% dell'informazione contenuta nei dati, ma si ottiene in cambio una notevole semplificazione nell'analisi dei dati, molto utile per uno *screening* iniziale dei dati.

Nei grafici delle figure seguenti, che prendono il nome di grafici dei *loadings*, sono rappresentati i valori dei coefficienti moltiplicativi *a*, *b*, ..., *n* di ciascuna variabile originaria relativi alle prime 4 PC.

In generale, la presenza di punti ravvicinati nei grafici dei *loadings* indica un'elevata correlazione diretta tra le variabili originarie corrispondenti, che possono costituire la base di partenza per la formulazione di ipotesi circa i meccanismi idrochimici che stanno alla base delle correlazioni individuate.

La distribuzione di punti in aree molto distanti nei grafici dei *loadings* deriva, al contrario, dalla presenza di correlazione negativa tra le variabili originarie corrispondenti.

Figura 2.1 Grafico PC1/PC2



Osservando il grafico tra la PC1 e la PC2 (Figura 2.1), che insieme spiegano oltre il 43 % della varianza complessiva dei dati, si nota che i punti corrispondenti a Pentaeritrite, Formaldeide, Arsenico e Ferro sono molto

prossimi fra di loro e sono ubicati in posizione opposta rispetto ai punti di Ossigeno disciolto e Potenziale Redox. Questo andamento potrebbe essere spiegato nei seguenti termini: la degradazione della Pentaeritrite e, in minor misura, della Formaldeide e dell'Acetaldeide (tutti composti considerati biodegradabili, fonte: United States Library of Medicine¹) determina il consumo dell'Ossigeno disciolto a causa dell'attività dei batteri aerobici, che a sua volta determina una riduzione del potenziale redox e l'instaurarsi di un ambiente riducente, che induce la solubilizzazione del Ferro e dell'Arsenico contenuto nei terreni o adsorbito alle particelle solide sospese in acqua di falda.

Queste considerazioni sono confermate anche nel grafico PC1/PC3 (*Figura 2.2*), che insieme spiegano oltre il 42% della varianza totale dei dati originari, dove si osserva una forte correlazione tra Pentaeritrite, Ferro e Arsenico, variabili in posizione ancora una volta opposta all'Ossigeno disciolto e il potenziale redox. L'Acetaldeide e la Formaldeide appaiono qui molto vicini fra loro ma separati da Pentaeritrite, Ferro, Arsenico e Temperatura.

Nel grafico PC1/PC4 (*Figura 2.3*), che rappresenta circa il 40 % della varianza totale dei dati originari, si conferma appieno la correlazione tra Pentaeritrite, Ferro, Arsenico e Temperatura.

Un'osservazione molto importante che si può dedurre dai grafici della PCA è che la Melamina e il Manganese sono sempre molto distanti da tutti i parametri indicatori di biodegradazione, ciò può essere spiegato con il fatto che la Melamina è una sostanza organica poco biodegradabile nelle condizioni sito-specifiche (in accordo con quanto contenuto nella United States Library of Medicine²) e che il Manganese nel caso specifico potrebbe non dipendere semplicemente da processi riduttivi indotti esclusivamente da attività biodegradativa.

¹ <http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search/f?./temp/~LLYksD:1>
<http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search/f?./temp/~ul4GBf:1>
<http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search/f?./temp/~TwnRTM:1>

² <http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search/f?./temp/~CPRn9R:1>

Figura 2.2 Grafico PC1/PC3

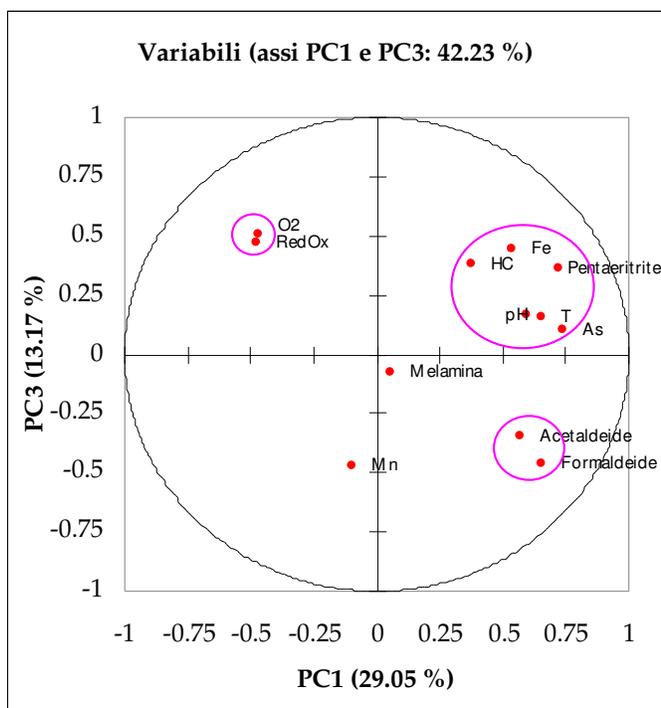
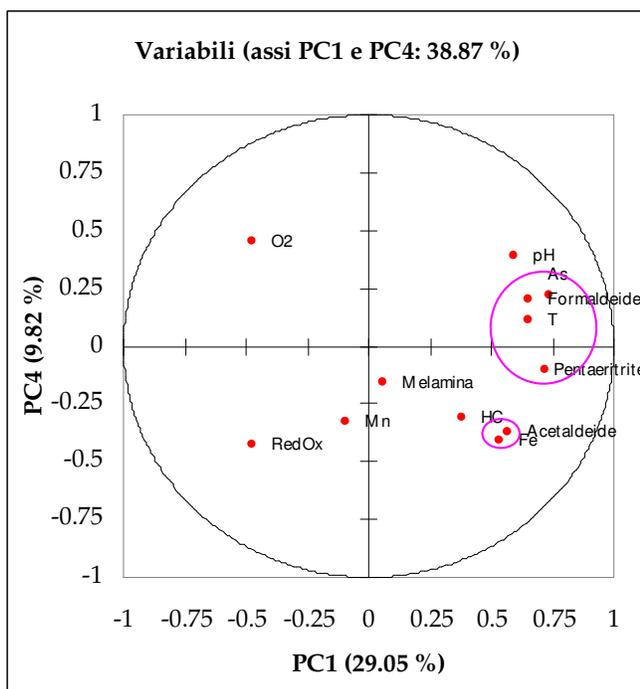


Figura 2.3 Grafico PC1/PC4



Sulla base dei risultati della PCA sono state approfondite alcune analisi su Ferro, Arsenico, Manganese e altri composti organici, come riportato nei parametri seguenti.

2.3 CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE DA FERRO IN FALDA

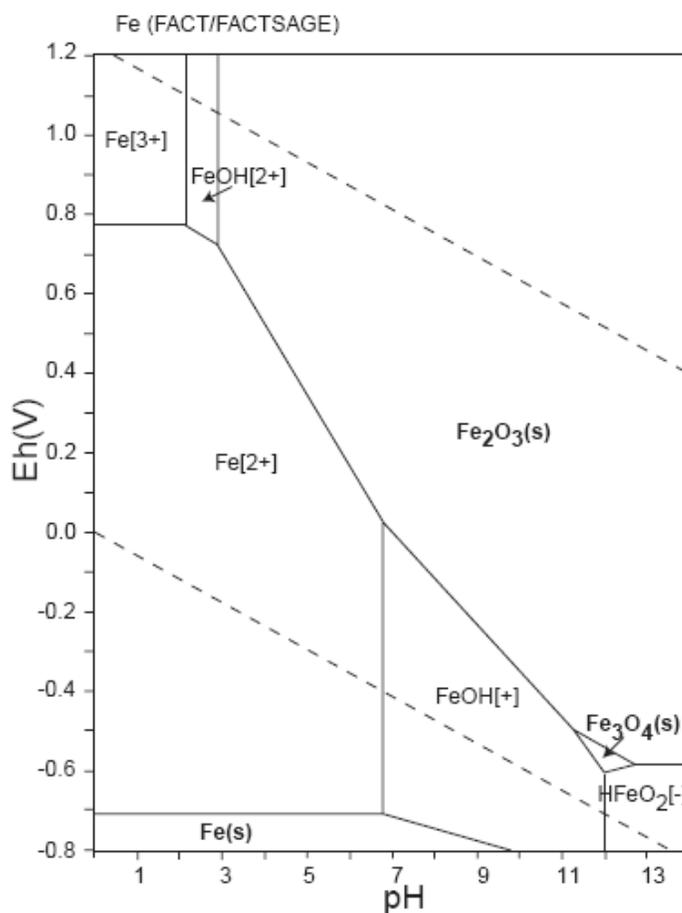
2.3.1 Caratteristiche del Contaminante

Il Ferro è uno degli elementi più abbondanti della crosta terrestre; è un elemento essenziale per le funzioni vitali dell'uomo ed il suo consumo giornalieri minimo deve essere compreso tra 10 e 50 mg/giorno, a seconda di diversi parametri tra cui età e sesso.

Cenni di Geochimica del Ferro

Nelle acque sotterranee, elevate concentrazioni di Ferro disciolto sono spesso associate a condizioni anaerobiche, in cui il Ferro è presente in forma bivalente e solubile (Fe^{2+}). La Figura 2.4 mostra il diagramma pH – Eh del Ferro, che fornisce indicazioni di carattere generale sulla forma (solida o disciolta) in cui il metallo è presente nelle acque sotterranee.

Figura 2.4 Ferro: Diagramma pH – Potenziale di Ossidoriduzione



Note: da *Atlas of Eh-pH diagrams – Intercomparison of Thermodynamic Databases* – National Institute of Advanced Industrial Science and Technology: Research Center for deep Geological Environments, 2005.

○ in **grassetto** le forme solide.

- (s) : presente in forma cristallina o amorfa.

Ferro: Valori Limite nelle Acque Potabili

Di seguito si riporta il valore accettabile di Ferro nelle acque potabili più cautelativo definito dalla *World Health Organization (WHO)* nel documento *Guidelines for drinking-water quality, third edition, incorporating first addendum (2006)*, relativamente all'assenza di effetti negativi per la salute umana:

- WHO - 2004 : 1.000 µg/l¹

Sia WHO che USEPA (*United States Environmental Protection Agency*) riportano che, a concentrazioni anche inferiori ai limite sopraelencato (300 µg/l), acque con presenza di Ferro potrebbero risultare sgradevoli da un punto di vista organolettico (per colore, odore e/o gusto), pur senza conseguenze negative per la salute umana; un valore simile (200 µg/l) è stato ripreso dalla legislazione italiana vigente sulla qualità delle acque destinate al consumo umano (Decreto Legislativo 31/01 – Allegato I, Parte C- parametri indicatori).

Sulla base di quanto sopra riportato, acque con concentrazioni di Ferro comprese tra 300 µg/l e 1.000 µg/l possono essere considerate sgradevoli da un punto di vista organolettico ma prive di significativa pericolosità per la salute umana.

Il trattamento delle acque con presenza di elevate concentrazioni di Ferro disciolto può essere effettuato tramite processi ossidativi (ad es. insufflaggio di aria) che, aumentando il contenuto di Ossigeno disciolto e di conseguenza il Potenziale Redox, causano la precipitazione del Ferro.

2.3.2 *Distribuzione del Contaminante*

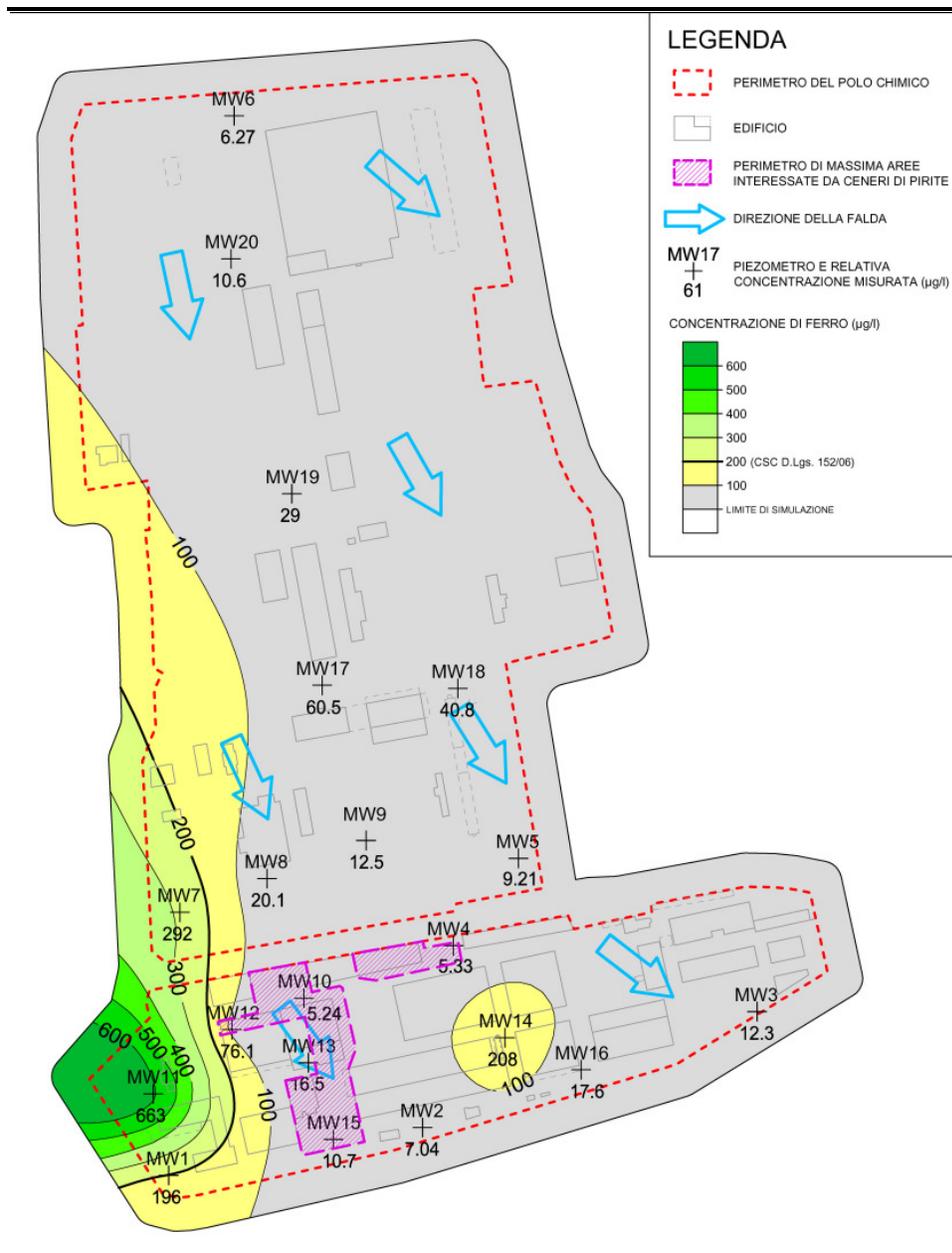
Relativamente al Ferro si riscontrano valori superiori alla CSC in corrispondenza dei piezometri ubicati nella porzione Sud-Occidentale dello stabilimento, con particolare riguardo per la porzione Occidentale della Zona A e la porzione Sud-Occidentale della Zona B.

La massima concentrazione di ferro ritrovata in Sito nel 2008 è 663 µg/l nel piezometro MW11, inferiore alla concentrazione accettabile per la salute umana stabilita dal WHO (1.000 µg/l). Nel 2007 il parametro Ferro non era stato ricercato nelle acque sotterranee.

La *Figura 2.5* mostra la distribuzione delle concentrazioni di Ferro in falda (marzo 2008).

¹ http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq0506_12.pdf

Figura 2.5 Ferro: Distribuzione Spaziale, 2008



Note: accanto alla sigla del piezometro è indicata la concentrazione di Ferro (espressa in µg/l). La CSC per il parametro Ferro è pari a 200 µg/l.

2.3.3 Tendenze e Tratti Peculiari della Contaminazione ed Associazioni con Altri Composti d'Interesse

L'elevata concentrazioni di Ferro nelle acque, mostrata in *Figura 2.5*, non sembra associata alla presenza di ceneri di pirite (ad eccezione forse del piezometro MW14), presenti soprattutto nella parte centrale della Zona A.

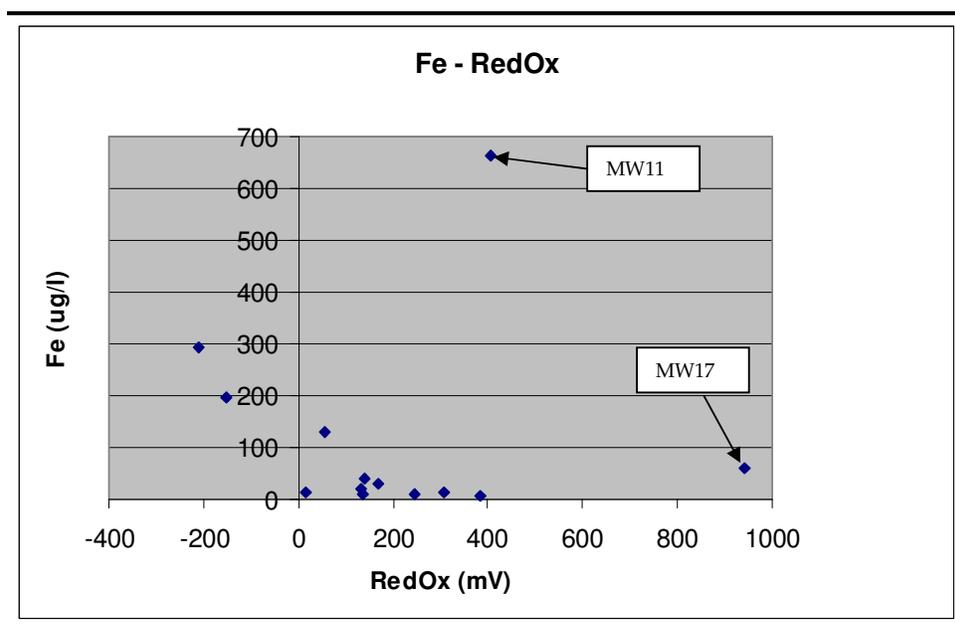
In ogni caso, al fine di analizzare la distribuzione del Ferro in falda indipendentemente da eventuali contributi causati dalla lisciviazione delle ceneri di pirite stesse, l'analisi delle correlazioni tra il Ferro disciolto ed altri

parametri non ha tenuto conto dei piezometri localizzati nell'area con presenza di ceneri di pirite o a valle di essa (MW2, MW4, MW10, MW12, MW13, MW14, MW15 ed MW16).

L'analisi delle correlazioni tra concentrazioni di Ferro ed altri parametri idrochimici ha portato a riconoscere una corrispondenza tra le concentrazioni di Ferro disciolto, il Potenziale Redox e la concentrazione di Ossigeno disciolto, come riportato nelle figure seguenti.

L'analisi dei dati ha tenuto conto solamente della campagna 2008, in quanto nel 2007 il parametro Ferro non era stato analizzato.

Figura 2.6 *Relazione Ferro Disciolto – Potenziale Redox*



La Figura 2.6 mostra che al diminuire del Potenziale Redox aumentano le concentrazioni di Ferro disciolto, in accordo con il grafico Eh-pH (Figura 2.4). Un'eccezione è rappresentata dal piezometro MW11, dove il Potenziale Redox registrato nel 2008 (406 mV) è anomalo e differente rispetto al valore misurato nel marzo 2007 (-2,3 mV), che lo renderebbe in linea con le altre osservazioni).

Un'altra eccezione è rappresentata dal piezometro MW17, che presenta valori misurati di Potenziale Redox di oltre 900 mV, da verificare nel corso delle prossime campagne di monitoraggio.

La figura seguente mostra la mappa degli isovalori del Potenziale Redox nel 2008; è possibile notare come la distribuzione mostrata sia congruente con quella del Ferro (cfr. Figura 2.5), con l'eccezione del piezometro MW11 (il valore misurato presso MW17 è stato rimosso).

Figura 2.7 Potenziale Redox : Distribuzione Spaziale, 2008

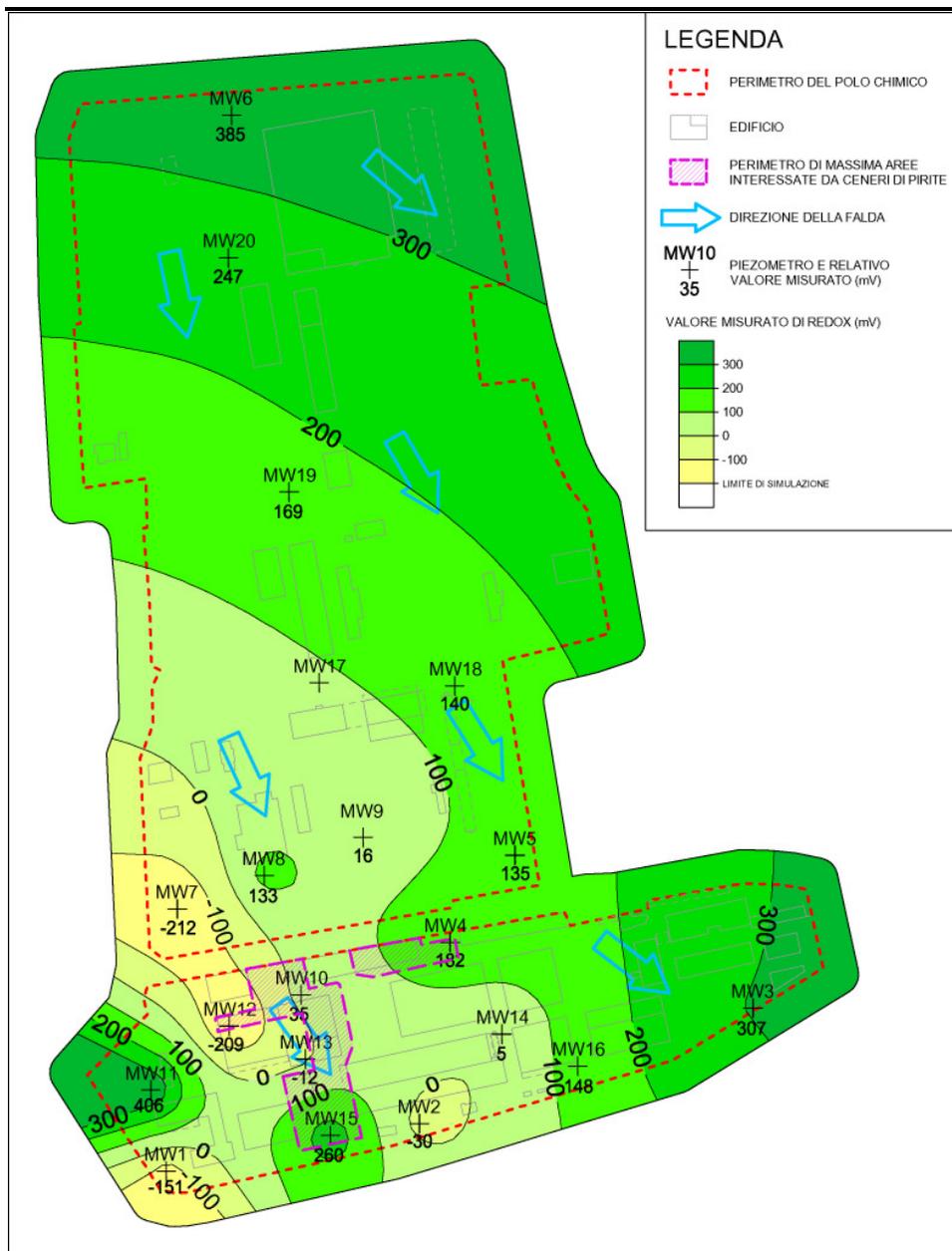
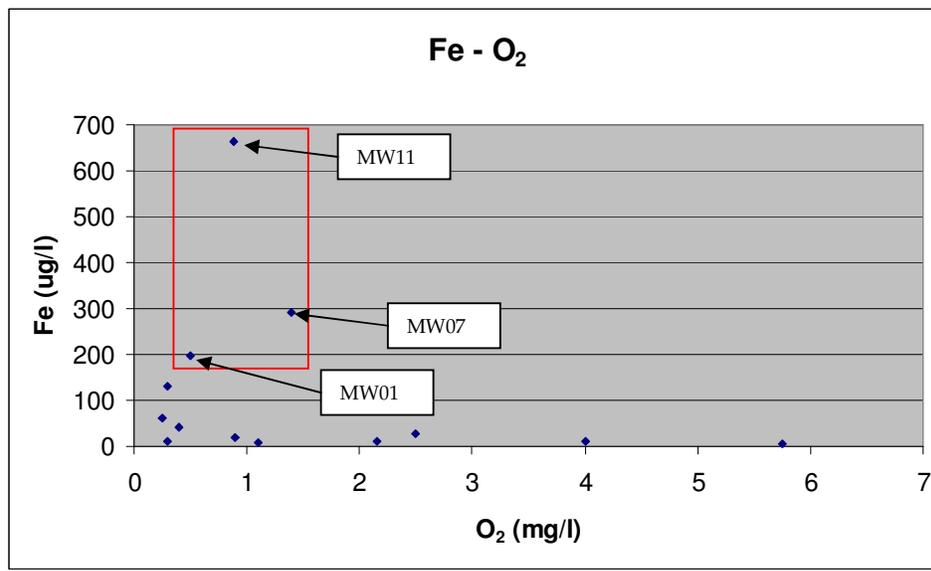


Figura 2.8 Relazione Ferro – Ossigeno Disciolto



La Figura 2.8 mostra che le concentrazioni di Ferro superiori alla CSC (pari a 200 µg/l) sono sempre associate a concentrazioni di Ossigeno disciolto inferiori a 2 mg/l, al di sopra delle quali non sono state ritrovate eccedenze di Ferro nella campagna 2008.

Le basse concentrazioni di Ossigeno disciolto e di Potenziale Redox potrebbero essere la conseguenza della biodegradazione di composti organici in falda; la correlazione più evidente è quella tra Ferro e Pentaeritrite, come riportato nelle figure seguenti:

Figura 2.9 Pentaeritrite: Distribuzione Spaziale, 2008

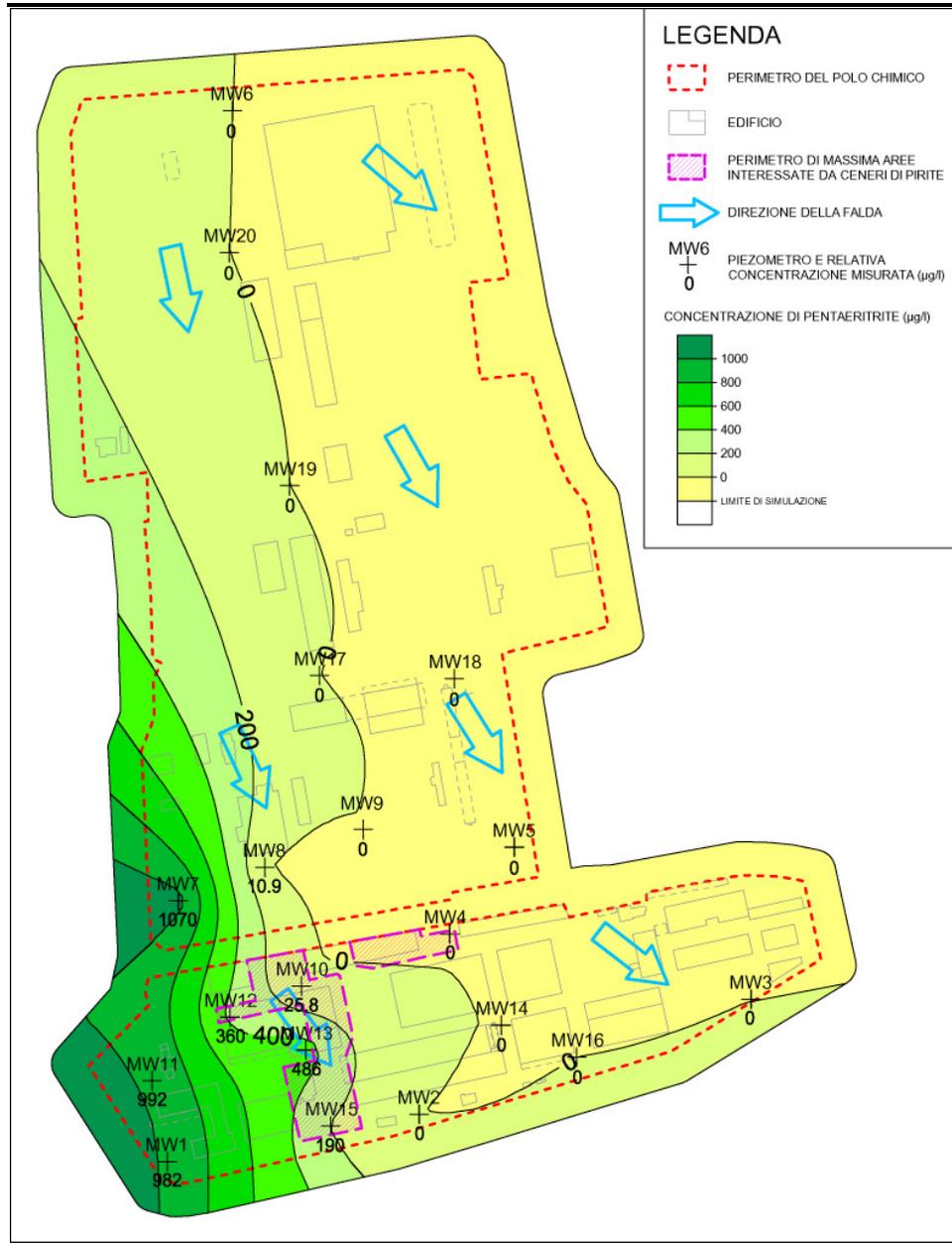
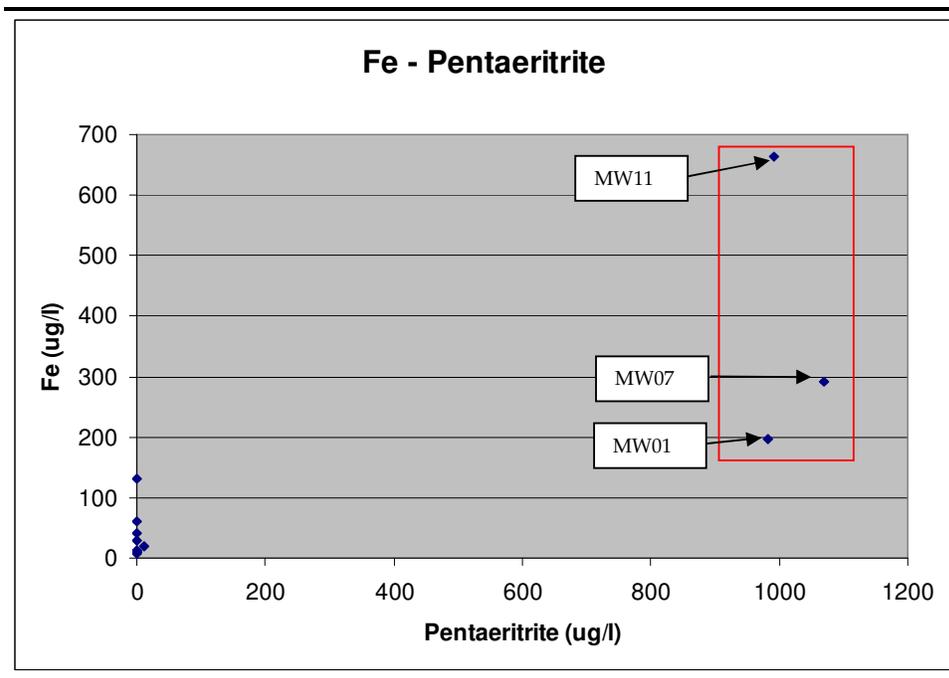


Figura 2.10 Relazione Ferro – Pentaeritrite



La Figura 2.5 e la Figura 2.9 mostrano come elevate concentrazioni di Ferro (nelle zone di monte idrogeologico o laterali rispetto al settore con ceneri di pirite) siano sempre associate a concentrazioni elevate di Pentaeritrite.

Figura 2.11 Formaldeide: Distribuzione Spaziale, 2008

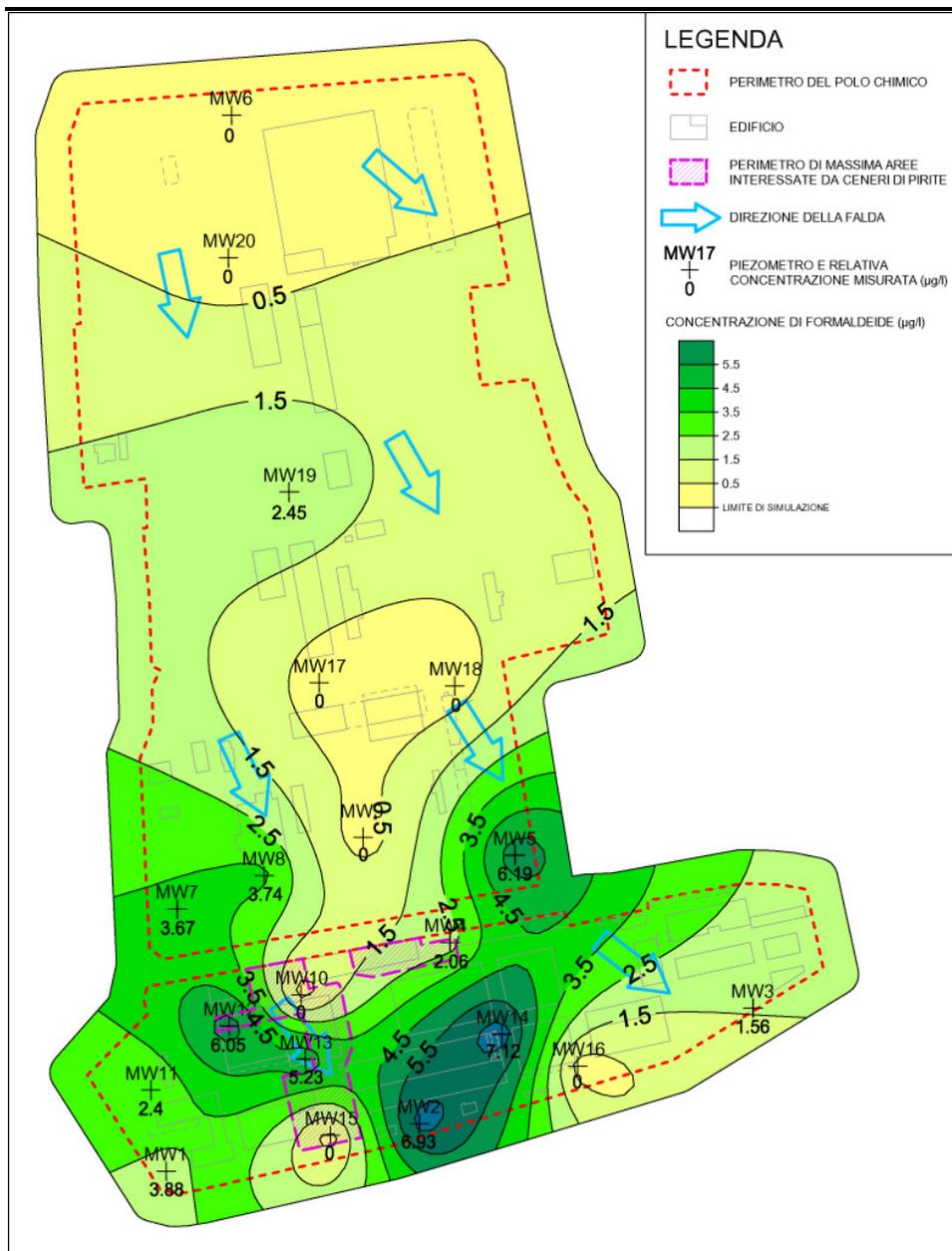
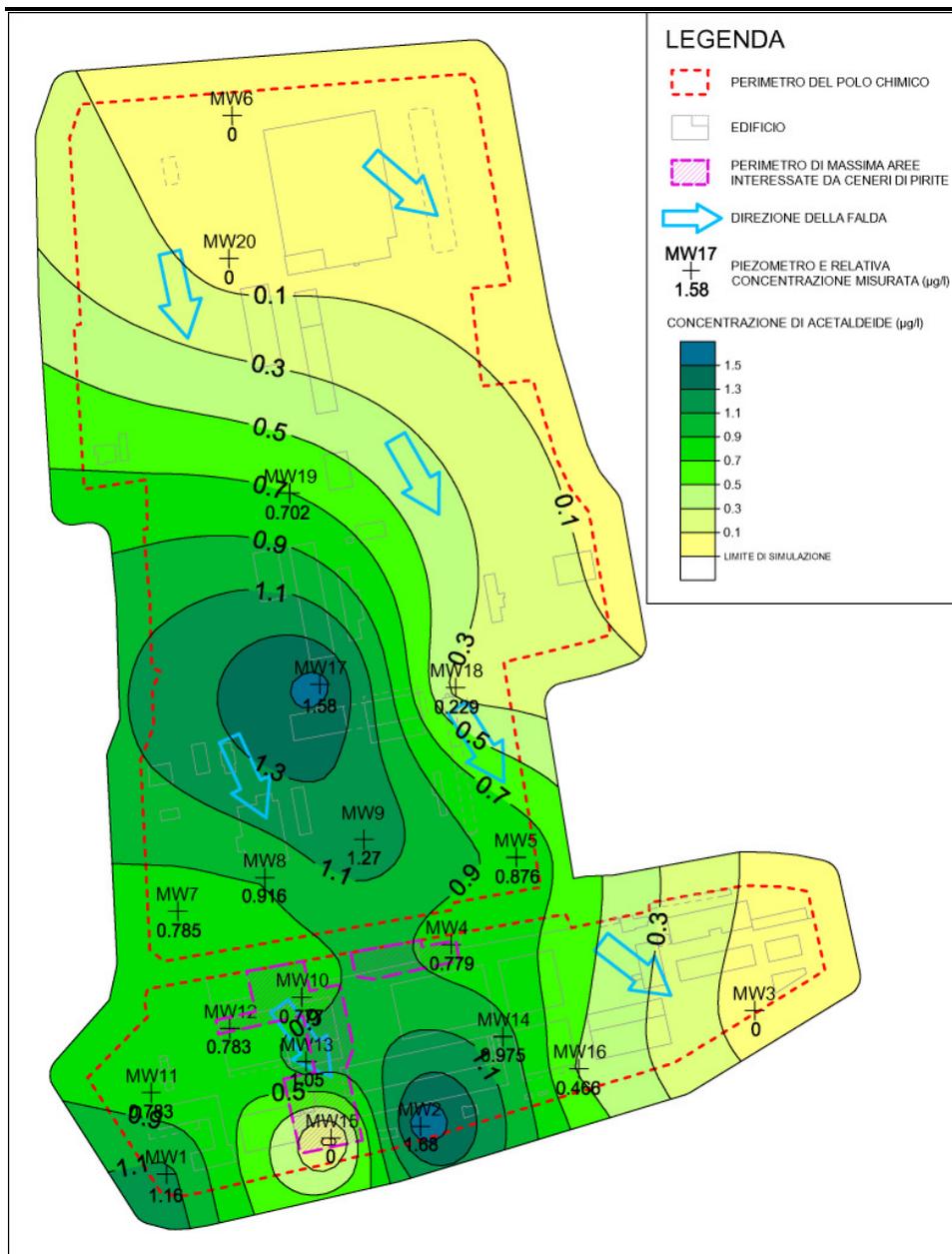


Figura 2.12 Acetaldeide: Distribuzione Spaziale, 2008



In conclusione, l'analisi dei grafici di correlazione e le mappe di isoconcentrazione mostra come il modello concettuale che lega la presenza di elevate concentrazioni di Ferro a processi di biodegradazione (che abbassano il potenziale Redox delle acque di falda) sia ragionevolmente supportato da dati oggettivi; inoltre, sembra esserci evidenza del fatto che la Pentaeritrite (composto biodegradabile) possa essere la sostanza maggiormente oggetto di biodegradazione, come indicato anche dall'Analisi delle Componenti Principali (§ 2.2).

2.4 CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE DA ARSENICO IN FALDA

2.4.1 *Caratteristiche del Contaminante*

L'Arsenico è un elemento presente naturalmente nella crosta terrestre, solitamente in forma di solfuro di arsenico, arseniati o arseniti.

Arsenico: Cenni di Geochimica

L'Arsenico nelle acque è generalmente presente in forma di Arsenito (stato di ossidazione +3) e/o Arseniato (stato di ossidazione +5); i processi che controllano le concentrazioni di Arsenico in acqua sono oggetto di studio da parte della comunità scientifica internazionale: i principali sono rappresentati dai processi di adsorbimento/desorbimento e dai processi di precipitazione/dissoluzione.

I processi di adsorbimento/desorbimento derivano dalla formazione/rottura dei legami tra le specie di Arsenico presenti in soluzione e le particelle solide sospese in acqua di falda, costituite, tra l'altro, da ossidi di Ferro, Manganese ed Alluminio e minerali argillosi. Sia l'Arseniato che l'Arsenito sono soggetti a processi di adsorbimento, ma l'Arsenito in maniera inferiore; ciò significa che in presenza di condizioni riducenti l'Arseniato viene ridotto ad Arsenito, composto maggiormente solubile, per cui le concentrazioni di Arsenico disciolto saranno maggiori.

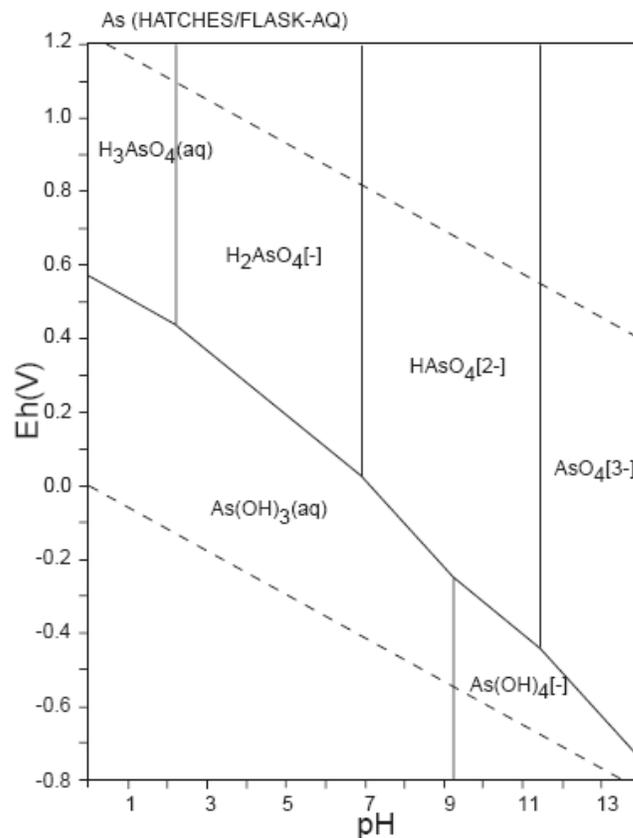
Oltre al Potenziale Redox anche il pH gioca un ruolo importante: infatti, alti valori di pH favoriscono la presenza di Arsenico disciolto in falda.

Inoltre, la presenza di altri ioni in soluzione (tra cui i Fosfati) può influire sul contenuto di Arsenico disciolto, a causa della competizione per i siti di legame presenti sulla sospensione solida.

Gli equilibri di dissoluzione/precipitazione interessano i composti solidi che costituiscono i grani di terreno di cui è composto l'acquifero e le sostanze in forma ionica che fluiscono in soluzione nell'acqua di falda. L'Arsenico spesso co-precipita con gli ossidi di Ferro, che possono agire nei confronti dell'Arsenico in soluzione come sorgente (quando passano in soluzione) o da trappola (quando precipitano).

La figura seguente mostra il diagramma pH – potenziale di ossidoriduzione (Eh) per l'Arsenico disciolto in acqua.

Figura 2.13 Arsenico: Diagramma pH – Potenziale di Ossidoriduzione



In condizioni riducenti sono generalmente predominanti le forme trivalenti di Arsenico (Arseniti – As(OH)_3), maggiormente solubili ed adsorbiti con minor forza alle particelle solide sospese rispetto a quelle pentavalenti (Arseniati – $\text{H}_2\text{AsO}_4^{[-]}$ e $\text{HAsO}_4^{[2-]}$). Di conseguenza, condizioni riducenti generalmente si accompagnano a maggiori concentrazioni di Arsenico disciolte in acqua.

Inoltre, condizioni riducenti portano al passaggio del Ferro(III) – insolubile - a Ferro(II) – solubile, causando generalmente il rilascio dell’Arsenico adsorbito agli ossidi di ferro presenti in falda.

Arsenico: Valori Limite nelle Acque Potabili

L’Arsenico presente nelle acque potabili può essere causa di effetti avversi sulla salute umana ed è pertanto considerato come una sostanza prioritaria da ricercare nelle acque.

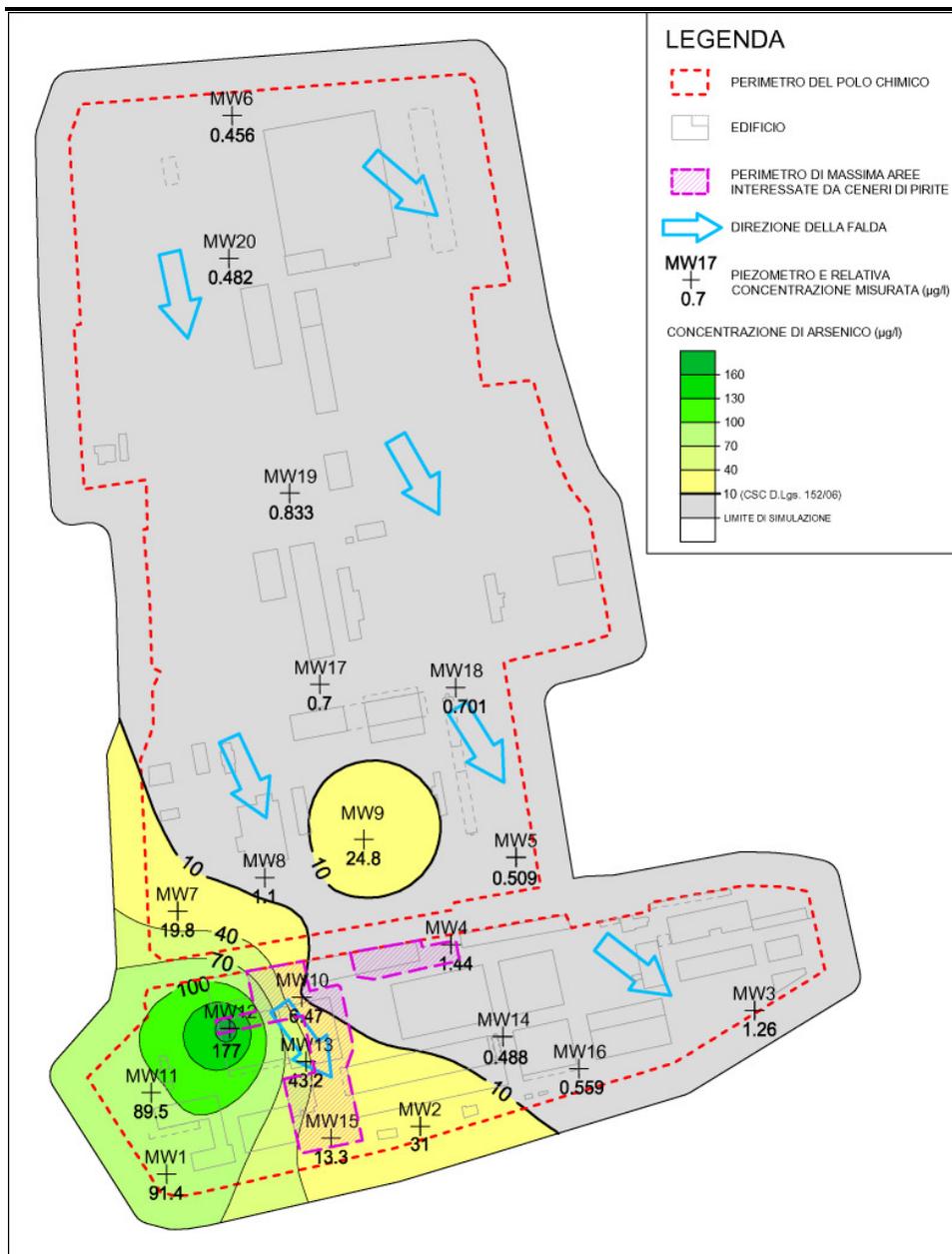
La legislazione italiana relativa all’utilizzo umano delle acque fissa un valore limite per l’Arsenico di $10 \mu\text{g/l}$; lo stesso valore è attualmente indicato come valore guida per le acque potabili dalla *World Health Organization (WHO)* e come valore limite dalla *United States Environmental Protection Agency (USEPA)*.

2.4.2 *Distribuzione del Contaminante*

Relativamente all'Arsenico si riscontrano valori superiori alla CSC in corrispondenza dei piezometri ubicati nella porzione Sud-Occidentale dello stabilimento, con particolare riguardo per la porzione Occidentale della Zona A e la porzione Sud-Occidentale della Zona B. Nelle zone C, D e nel settore settentrionale della zona B di stabilimento non si riscontrano eccedenze della CSC per Arsenico nelle acque di falda.

La figura seguente mostra la distribuzione spaziale dell'Arsenico in falda, relativamente alla campagna di marzo 2008.

Figura 2.14 Arsenico: Distribuzione Spaziale, 2008



Note: accanto alla sigla del piezometro è indicata la concentrazione di Arsenico (espressa in µg/l). La CSC per il parametro Arsenico è pari a 10 µg/l.

La presenza di concentrazioni di Arsenico superiori alla CSC in falda potrebbe essere correlata alla presenza di ceneri di pirite in MW2, MW12, MW13 ed MW15; tale associazione non è estendibile ai piezometri MW7, MW9, MW11 ed MW1 data la direzione di flusso. Di conseguenza sono state analizzate le possibili correlazioni con Potenziale Redox, Ossigeno disciolto, Ferro e composti organici.

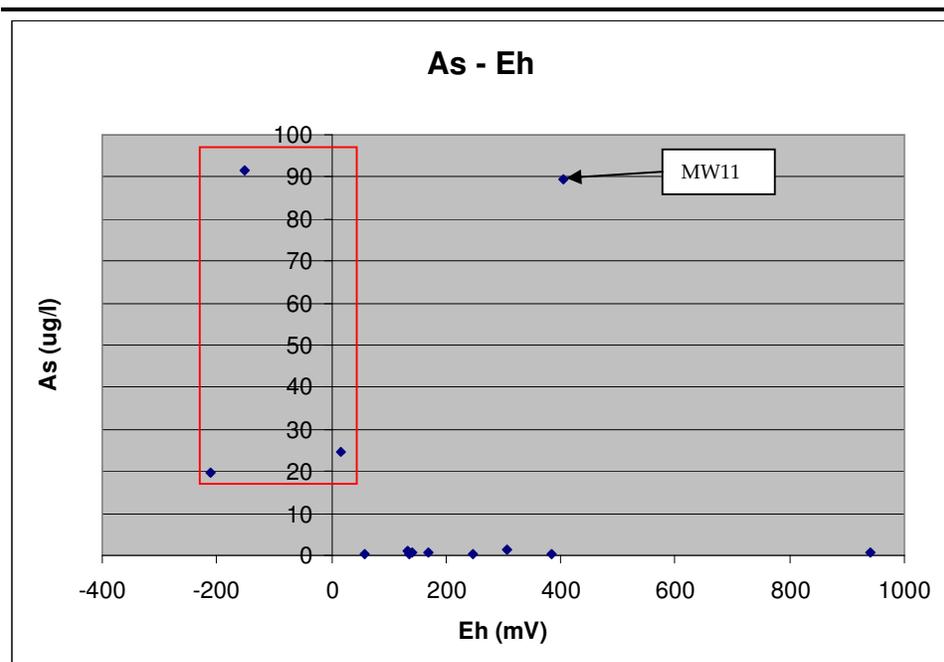
2.4.3 Tendenze e Tratti Peculiari della Contaminazione ed Associazioni con Altri Composti d'Interesse

L'analisi delle mappe delle isoconcentrazioni permette di rilevare una corrispondenza tra le aree con elevate concentrazioni di Arsenico e quelle con elevati valori di Ferro, Potenziale Redox e Pentaeritrite presso MW7, MW11 ed MW1.

Come per il Ferro, per evidenziare l'andamento dell'Arsenico indipendentemente da eventuali contributi dovuti alla lisciviazione delle ceneri di pirite, sono stati esclusi dall'analisi dei dati i piezometri localizzati in corrispondenza o a valle delle ceneri di pirite stesse (MW2, MW4, MW10, MW12, MW13, MW14, MW15 ed MW16).

I grafici ottenuti sono presentati nelle figure seguenti.

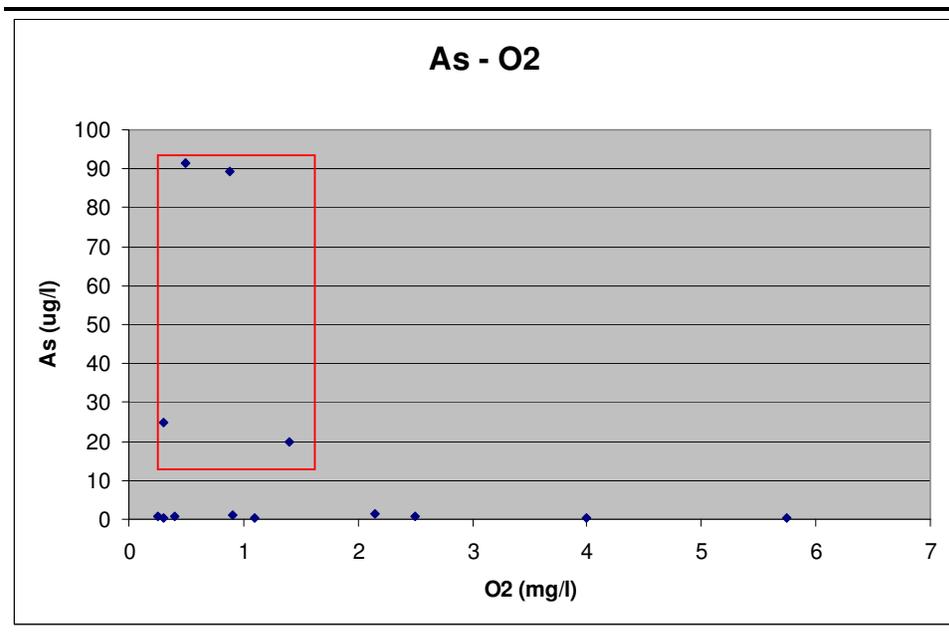
Figura 2.15 Relazione Arsenico – Potenziale Redox, 2008



Nota: il potenziale redox registrato nel 2008 nel piezometro MW11 (406 mV) risulta anomalo e differente rispetto al valore misurato nel marzo 2007 (-2,3 mV), che lo renderebbe in linea con le altre osservazioni.

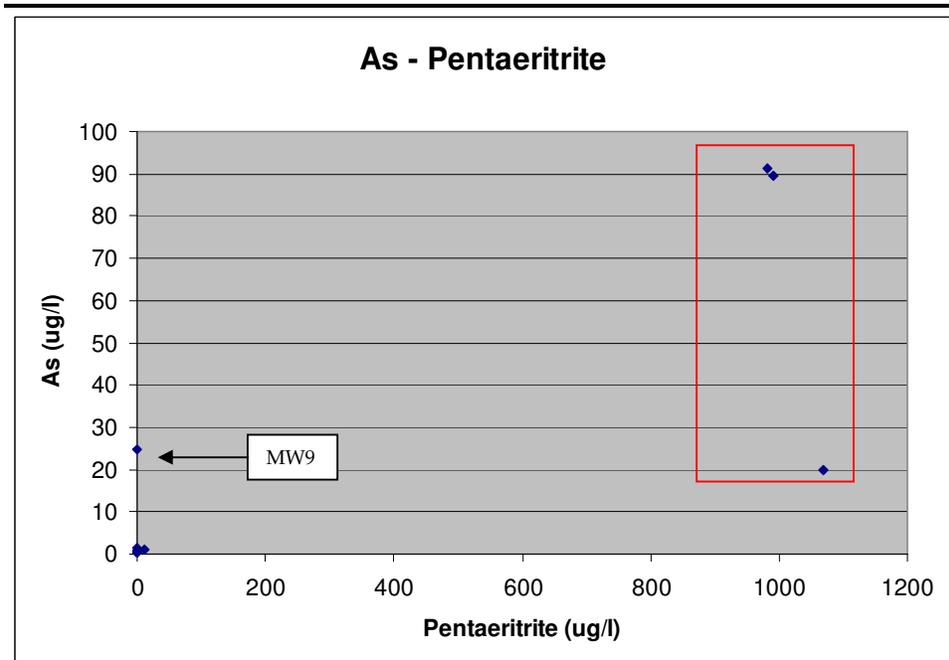
La Figura 2.15 mostra come le concentrazioni di Arsenico siano inversamente proporzionali al Potenziale Redox, con l'unica eccezione del piezometro MW11 (analogamente al Ferro).

Figura 2.16 Relazione Arsenico –Ossigeno Disciolto, 2008



La Figura 2.16 mostra come le concentrazioni di Arsenico eccedenti le CSC siano presenti solamente in corrispondenza di valori di Ossigeno disciolto inferiori a 2 mg/l, analogamente al Ferro.

Figura 2.17 Relazione Arsenico – Pentaeritrite, 2008



Nota: l'elevato contenuto di Arsenico del piezometro MW9 non sembra correlato con la presenza di Pentaeritrite. Il piezometro MW9 è localizzato nella parte centrale della Zona B e ha fatto registrare un valore elevato di Melamina (1860 µg/l).

La *Figura 2.17* mostra come le concentrazioni di Arsenico eccedenti le CSC siano generalmente associate ad elevate concentrazioni di Pentaeritrite, analogamente a quanto accade per il Ferro.

Ciò porta a definire un possibile modello concettuale in cui la degradazione di elevate concentrazioni di sostanza organica (principalmente Pentaeritrite) determina una diminuzione del Potenziale Redox nel margine Sud-Occidentale del Sito, con conseguente riduzione e solubilizzazione dell'Artenico e del Ferro; quindi è possibile che:

- l'Artenico adsorbito sugli ossidi di Ferro originariamente in forma solida passi in soluzione; e/o
- avvenga il desorbimento dal particolato presente nell'acquifero dell'Artenico prima presente in forma di pentavalente ma ora presente in forma trivalente (maggiormente solubile).

Indipendentemente dal fenomeno in atto, la diminuzione del Potenziale Redox sembra portare ad un aumento delle concentrazioni di Arsenico e Ferro in falda.

2.5 CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE DA MANGANESE IN FALDA

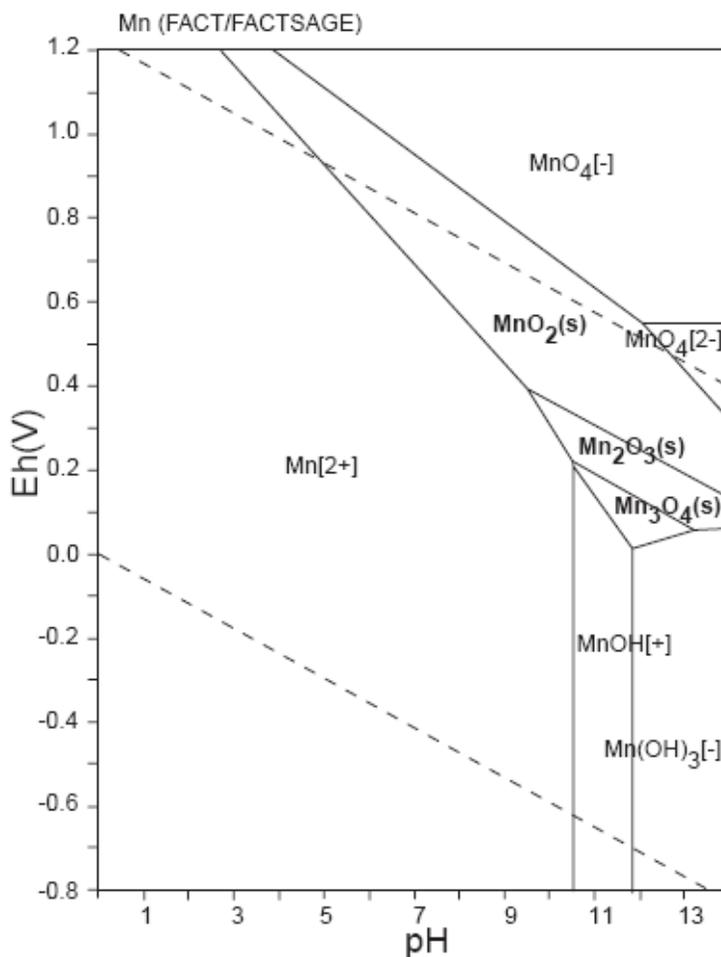
2.5.1 Caratteristiche del Contaminante

Il Manganese è uno degli elementi più abbondanti della crosta terrestre, solitamente associato con il Ferro; risulta contenuto in più di 100 minerali ma in natura non è presente nella sua forma elementare. Il Manganese è un elemento essenziale per le funzioni vitali dell'uomo e degli animali, in quanto coinvolto nell'attivazione e nel funzionamento di numerosi enzimi. Il manganese può esistere in 11 stati di ossidazione diversi; i composti più importanti del Manganese, sia sotto l'aspetto biologico che ambientale, sono quelli contenenti Mn^{2+} , Mn^{4+} e Mn^{7+} .

Nelle acque sotterranee, elevate concentrazioni di Manganese disciolto sono spesso associate a condizioni anaerobiche; la forma bivalente (Mn^{2+}) è predominante nell'intervallo di pH 4 ÷ 7, mentre forme più ossidate possono essere presenti a pH più elevati o come conseguenza di attività batterica. Il Manganese può essere adsorbito al terreno, a seconda del contenuto di carbonio organico e della capacità di scambio cationico del terreno stesso. Il Manganese può bioaccumulare nei livelli inferiori della catena trofica (fitoplancton, alghe, molluschi ed alcuni pesci), ma non negli organismi superiori; la biomagnificazione lungo la catena alimentare non è ritenuta significativa (*World Health Organization - WHO, 2004*).

La figura seguente mostra il diagramma pH – Eh del Manganese, in grado di fornire indicazioni di carattere generale sulla forma (solida o disciolta) in cui il metallo è presente nelle acque sotterranee.

Figura 2.18 Manganese: Diagramma pH- Potenziale di Ossidoriduzione



Note: da *Atlas of Eh-pH diagrams – Intercomparison of Thermodynamic Databases* – National Institute of Advanced Industrial Science and Technology: Research Center for deep Geological Environments, 2005.

- o in **grassetto** le forme solide.
- o (s) : presente in forma cristallina o amorfa.

Di seguito si riportano i valori guida di manganese nelle acque potabili stabiliti da *United States Environmental Protection Agency (USEPA)* nel documento *Drinking Water Health Advisory for Manganese* (2004) e *WHO* nel documento *Guidelines for drinking-water quality, third edition, incorporating first addendum* (2006), relativamente all'assenza di effetti negativi per la salute umana:

- *USEPA* - 2004: 300 $\mu g/l$
(http://www.epa.gov/safewater/ccl/pdfs/reg_determine1/support_ccl_magnese_dwreport.pdf)
- *WHO* - 2004 : 400 $\mu g/l$
(http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq0506_12.pdf):

Entrambe le fonti citate riportano inoltre come, a concentrazioni anche inferiori ai limiti sopraelencati (50 $\mu g/l$), acque con presenza di Manganese

potrebbero risultare sgradevoli da un punto di vista organolettico (colore, odore e/o gusto), pur senza conseguenze negative per la salute umana; tale valore è stato ripreso dalla legislazione italiana vigente sulla qualità delle acque destinate al consumo umano (Decreto Legislativo 31/01 – Allegato I, Parte C- parametri indicatori).

Sulla base di quanto sopra riportato, acque con concentrazioni di Manganese comprese tra 50 µg/l e 300 µg/l possono essere considerate sgradevoli da un punto di vista organolettico ma prive di significativa pericolosità per la salute umana.

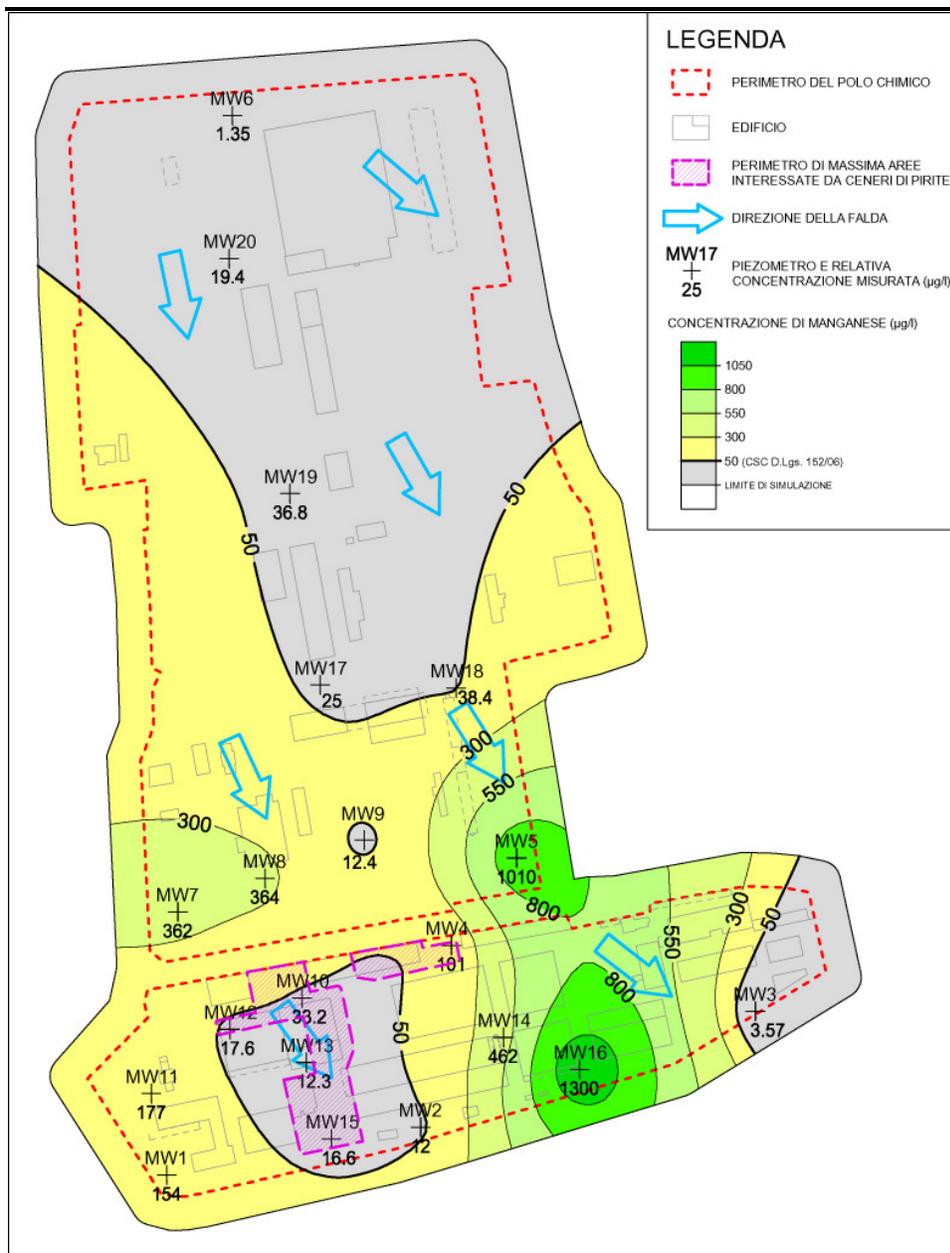
Il trattamento delle acque con presenza di elevate concentrazioni di Manganese disciolto può essere effettuato tramite processi ossidativi (ad es. insufflazione di aria) che, aumentando il contenuto di Ossigeno disciolto e di conseguenza il Potenziale Redox, causano la precipitazione del Manganese.

2.5.2 *Distribuzione del Contaminante*

Relativamente al Manganese, sono stati riscontrati superamenti della CSC lungo parte del confine meridionale della Zona A oltre che nella porzione Occidentale e centrale della medesima zona. Analoghi superamenti sono stati riscontrati nel settore Meridionale della zona B. L'andamento delle concentrazioni del Manganese nelle acque di falda mostra a grande scala un carattere discontinuo, con la porzione centro-meridionale dello stabilimento caratterizzata da concentrazioni superiori alle CSC, fatto salvo alcune aree specifiche poste nella porzione Centro-Occidentale della Zona A.

La figura seguente mostra la distribuzione delle concentrazioni di Manganese in falda (marzo 2008).

Figura 2.19 Manganese: Concentrazioni in Falda - Marzo 2008 ($\mu\text{g/l}$)



Note: accanto alla sigla del piezometro è indicata la concentrazione di manganese (espressa in $\mu\text{g/l}$). La CSC per il Manganese è pari a $50 \mu\text{g/l}$.

A conferma di quanto riscontrabile con l'Analisi delle Componenti Principali (§ 2.2), è possibile notare come la distribuzione del Manganese sia molto differente dalla distribuzione spaziale di Ferro, Arsenico, Ossigeno disciolto e Potenziale Redox; sembra quindi che alla base della presenza di Manganese in falda vi sia una causa differente rispetto a quella ipotizzata per Ferro ed Arsenico.

L'analisi delle correlazioni tra concentrazioni di Manganese e altri parametri idrochimici ha portato a riconoscere una poco marcata corrispondenza tra la distribuzione spaziale del Manganese e la distribuzione spaziale dell'Ossigeno disciolto, come riportato nelle figure seguenti. Più in generale, si evidenzia che la distribuzione dell'Ossigeno disciolto è, infatti, prevalentemente correlabile alla distribuzione dei composti biodegradabili.

Le successive figure mostrano, in ogni caso, che le concentrazioni di Manganese superiori alla CSC (pari a 50 µg/l) risultano sempre associate a concentrazioni di Ossigeno disciolto inferiori a 2 mg/l. Al di sopra di questa concentrazione di Ossigeno disciolto non sono state ritrovate eccedenze di Manganese nel periodo 2007 - 2008. Parimenti, un certo grado di correlabilità appare identificabile anche tra le variazioni delle concentrazioni di Manganese e quelle del Potenziale Redox.

Figura 2.20 Ossigeno Disciolto: Concentrazioni in Falda - Marzo 2008 ($\mu\text{g/l}$)

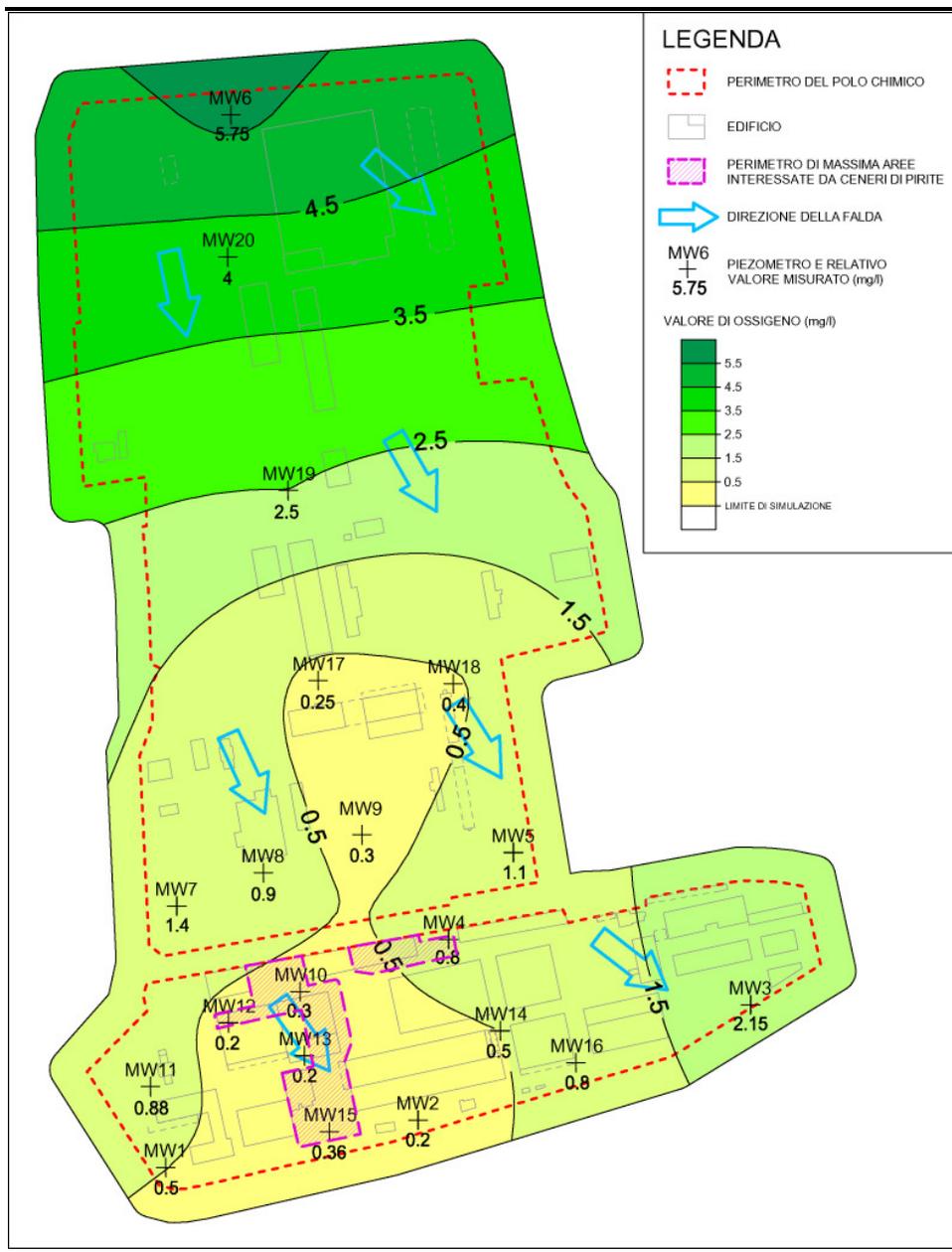
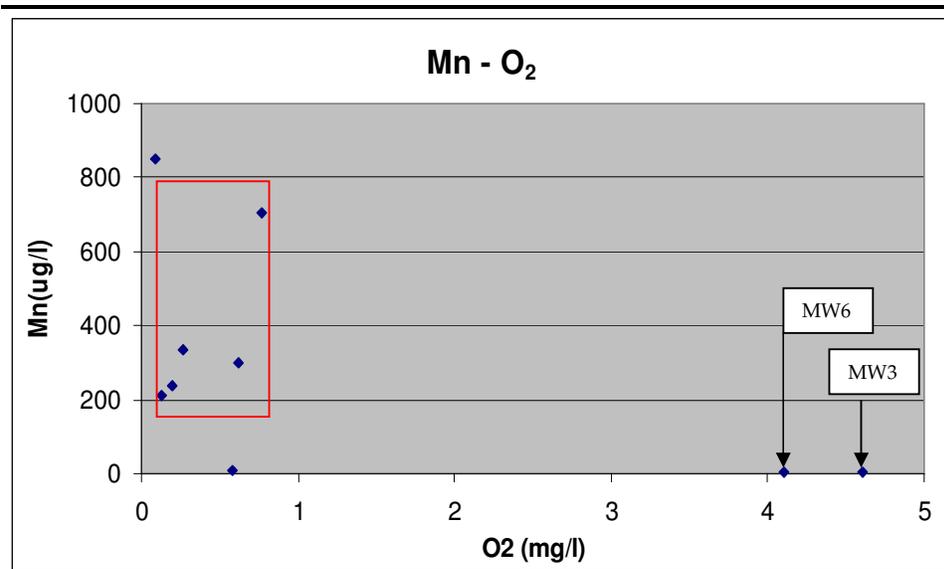
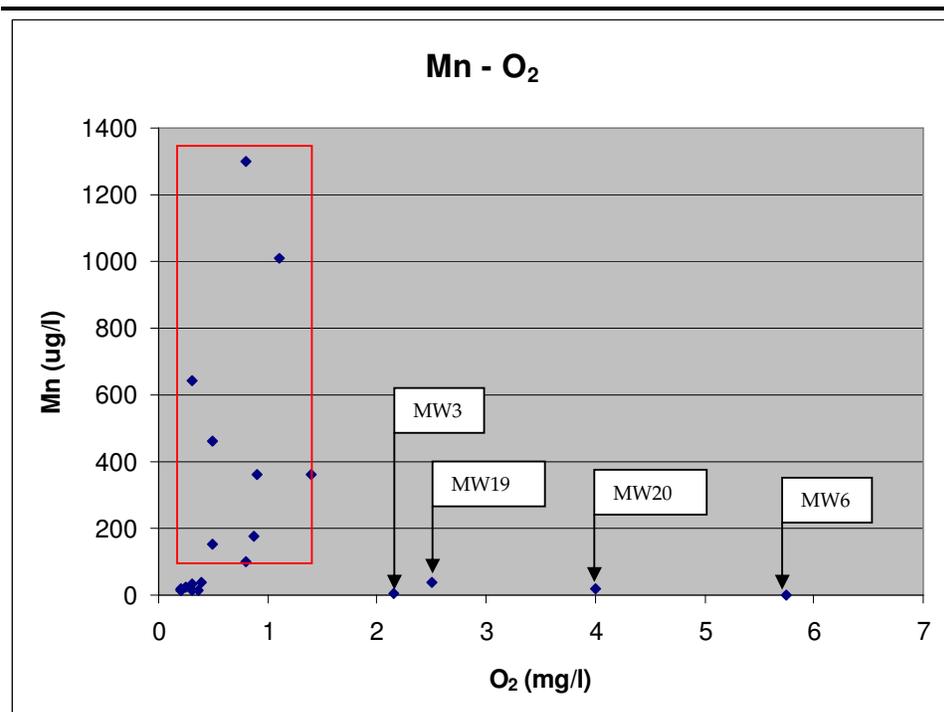


Figura 2.21 Manganese Disciolto – Ossigeno Disciolto: Marzo 2007



Nota: all'interno del riquadro rosso sono mostrate le eccedenze della CSC ex D.Lgs. 152/06 (50 µg/l)

Figura 2.22 Manganese Disciolto – Ossigeno Disciolto: Marzo 2008



Nota: all'interno del riquadro rosso sono mostrate le eccedenze della CSC ex D.Lgs. 152/06 (50 µg/l)

Come accennato nei paragrafi precedenti, il principale composto organico riscontrabile nelle acque di falda e dalla cui degradazione originano, con ogni probabilità, le elevate concentrazioni di Ferro e Arsenico riscontrate, è la Pentaeritrite, altamente biodegradabile, la cui distribuzione spaziale è fortemente correlata a quella di questi metalli e della temperatura e inversamente correlata alla concentrazione di Ossigeno disciolto e al valore di Potenziale Redox.

Le concentrazioni di Pentaeritrite crescono spostandosi dal settore Orientale del sito verso il settore Occidentale e raggiungono i valori più elevati (circa 1.000 µg/l) presso i piezometri MW7, MW11, MW1.

Altre sostanze organiche presenti in falda al di sotto del sito di Castellanza sono la Formaldeide e l'Acetaldeide, che presentano le massime concentrazioni, rispettivamente, presso il settore Sud-Occidentale per la Formaldeide (concentrazioni massima di 7,12 µg/l presso MW14) e Centro-Sud del sito per l'Acetaldeide (concentrazioni di circa 1,7 µg/l presso MW2 e, in subordine, MW17), per cui la distribuzione di Formaldeide ed Acetaldeide non è del tutto correlabile.

Un ulteriore composto organico sito-specifico è la Melamina (sostanza scarsamente biodegradabile), che presenta un picco molto localizzato con concentrazioni superiori a 1.800 µg/l presso il piezometro MW9, nel settore Centro-Meridionale dello stabilimento. La distribuzione spaziale di tale composto è quindi difficilmente correlabile a quella degli altri contaminanti presenti in sito e ai parametri che indicano la presenza di processi biodegradativi in corso (Ossigeno disciolto, potenziale redox, Ferro, Arsenico).

CONCLUSIONI

Dall'analisi della distribuzione dei contaminanti presenti nelle acque di falda sottostanti il Polo Chimico di Castellanza – Olgiate Olona si possono trarre le seguenti conclusioni:

- esiste una evidente correlazione diretta tra le distribuzioni spaziali di Pentaeritrite, Ferro, Arsenico e della temperatura della falda, che assumono i valori più elevati presso lo spigolo Sud-Ovest del sito. Questi parametri sono inversamente correlati alla concentrazione di Ossigeno disciolto e al valore di potenziale redox;
- ciò potrebbe essere spiegato nei seguenti termini: la degradazione della Pentaeritrite determina un aumento della temperatura dell'acqua di falda e il consumo dell'Ossigeno disciolto (OD) a causa dell'attività dei batteri aerobi; la ridotta disponibilità di ossigeno, a sua volta, determina una riduzione del potenziale redox e l'instaurarsi di un ambiente riducente, che induce la solubilizzazione del Ferro e dell'Arsenico;

- la Formaldeide e l'Acetaldeide presentano una moderata correlazione con i parametri indicatori di processi biodegradativi in atto (Ferro, Arsenico, OD, potenziale redox, temperatura) e presentano le concentrazioni massime nel settore Centro-Meridionale del sito;
- la Melamina presenta un picco positivo molto localizzato nel settore centrale dello stabilimento, che non appare correlato con gli altri parametri sito-specifici;
- la distribuzione del Manganese non appare correlata a quella degli altri metalli né a quella dei contaminanti organici presenti in falda o dei parametri chimico-fisici indicatori della presenza di processi degradativi in atto; per tali motivi, si ipotizza che la presenza di Manganese non derivi da tali processi, ma da differenti meccanismi ancora da identificare, che potranno essere approfondite nell'ambito delle attività di Prova Pilota per *Air Sparging* di cui al § 5.

Al fine di raccogliere ulteriori elementi utili alla definizione dell'origine delle elevate concentrazioni ritrovate per i parametri Ferro, Manganese e Arsenico, si prevedono attività di monitoraggio idrochimico specifiche di cui al § 6.1.

3.1 RISULTATI DELLE PROVE LEFRANC

Nel corso del campo prove e specificamente dell'installazione del piezometro MW21, sono state eseguite alcune prove LeFranc a carico costante per la determinazione della conducibilità idraulica dell'acquifero. Le prove sono state eseguite a diverse profondità da piano campagna e vanno ad integrare quelle precedentemente effettuate nell'ambito dell'iter di caratterizzazione delle aree *ex-AMI*, riportate nel documento *Rapporto di Caratterizzazione delle Aree AMI Interne e Limitrofe al Polo Chimico di Castellanza – Olgiate Olona (ERM, Giugno 2008)*.

Nella seguente *Tabella 3.1* vengono sintetizzati gli esiti delle prove LeFranc effettuate, includendo sia i dati già inclusi nel Rapporto di Caratterizzazione di cui sopra (piezometri da MW1 a MW19) sia i dati acquisiti nell'ottobre 2008 relativi al piezometro MW21 (i cui rapporti di prova sono riportati in Allegato B2).

Tabella 3.1 Prove LeFranc

Piezometri	Profondità esecuzione prova (m da p.c.)	Conducibilità		Matrice
		Idraulica (cm/s)		
MW 1	35	$1,45 \times 10^{-03}$		Terreno saturo
MW 15	40	$3,20 \times 10^{-02}$		Terreno saturo
MW 15	50	$1,90 \times 10^{-02}$		Terreno saturo
MW 15	60	$7,80 \times 10^{-03}$		Terreno saturo
MW 16	40	$2,10 \times 10^{-02}$		Terreno saturo
MW 16	50	$4,70 \times 10^{-02}$		Terreno saturo
MW 16	60	$1,00 \times 10^{-02}$		Terreno saturo
MW 17	40	$2,80 \times 10^{-03}$		Terreno saturo
MW 19	40	$7,60 \times 10^{-02}$		Terreno saturo
MW21	10	$2,90 \times 10^{-03}$		Terreno insaturo
MW21	19	$3,40 \times 10^{-04}$		Terreno insaturo
MW21	31	$5,60 \times 10^{-04}$		Terreno insaturo
MW21	40	$5,50 \times 10^{-04}$		Terreno saturo
MW21	50	$9,20 \times 10^{-04}$		Terreno saturo
MW21	60	$6,10 \times 10^{-04}$		Terreno saturo
MW21	70	$3,20 \times 10^{-05}$		Terreno saturo (Limo Sabbioso)
MW21	96	$1,46 \times 10^{-03}$		Terreno saturo

Sulla base dei dati sopra riportati, si evidenzia come il valore medio di conducibilità idraulica del terreno saturo sia pari a circa $1,6 \times 10^{-02}$ cm/s e come a profondità superiori a circa 50 m da p.c. i valori di conducibilità idraulica determinati risultino leggermente inferiori a quelli inerenti gli orizzonti più superficiali dell'acquifero.

Nell'ambito della procedura di caratterizzazione ex-D.Lgs.152/06 delle Aree ex-AMI presso il Polo Chimico di Castellanza - Olgiate Olona, *ERM Italia* è stata incaricata da *AMI Italia* (oggi *Chemisol*) di acquisire tutti i dati utili per il dimensionamento di un'opera di contenimento idraulico del Polo Chimico ex-*Montedison*, con particolare riguardo alla presenza di Arsenico nelle acque nella porzione Sud-Occidentale del sito (cfr. § 2.4).

Per definire il numero, l'ubicazione e la portata d'acqua di falda da estrarre dai pozzi barriera si è deciso di eseguire un campo prove idrauliche, descritto nel Protocollo Operativo presentato alle Autorità nel Giugno 2008 (cfr. *Protocollo del Campo Prove Idrauliche - Aree AMI - Polo Chimico di Castellanza - Olgiate Olona, ERM Giugno 2008*). L'area di esecuzione del campo prove è collocata all'estremo Occidentale del confine di valle del sito. Tale posizionamento è stato precauzionalmente selezionato, tenendo conto che tale porzione del margine di stabilimento è caratterizzata dalle maggiori concentrazioni di arsenico in falda, con riferimento ai monitoraggi eseguiti a partire dal Marzo 2007.

Per l'esecuzione del campo prove sono stati realizzati, tra Luglio e Ottobre 2008 (cfr. *Allegato B1*) un pozzo, denominato PW1, e due piezometri, denominati MW21 e MW1 bis.

Il piezometro MW21 è stato realizzato a carotaggio continuo con esecuzione, in corso d'avanzamento, di alcune prove di permeabilità di tipo LeFranc (profondità 10m, 19m, 31m, 40m, 50,5m, 60m, 70m e 95,5m da p.c.) ad integrazione di quelle già eseguite nel corso delle attività di caratterizzazione (cfr § 3.1). Il piezometro MW1bis è stato prodotto mediante approfondimento fino a 100 m da p.c. (con perforazione a distruzione di nucleo) del preesistente piezometro MW1, profondo 40 m da p.c.

La definizione della profondità del pozzo pilota e dei piezometri di monitoraggio è stata effettuata in base all'esigenza di captare precauzionalmente l'intero spessore del primo acquifero nell'area di studio, anche in osservanza della profondità di riferimento prevista per tale acquifero dalla Deliberazione della Regione Lombardia VI/1431 del 22/12/1999 (parere per grande derivazione acque pubbliche sotterranee ad uso industriale presso il sito di Castellanza - Olgiate Olona).

Le attività di perforazione del piezometro MW21 e del pozzo pilota PW1 sono state precedute dall'esecuzione di prescavi a mezzo miniescavatore, al fine dell'accertamento della possibile presenza di sottoservizi.

Nel corso delle attività di perforazione del pozzo pilota PW1 sono stati prelevati, a varie profondità, campioni di terreno per la caratterizzazione dei terreni di risulta. In campioni prelevati, denominati PW1 (1-5m), PW1 (5-8,5 m), PW1 (8,5-10 m) e PW1 (20-22 m), sono stati sottoposti ad analisi di laboratorio come da referti di prova riportati in *Allegato C*, mostrando sempre, per i parametri di interesse, concentrazioni inferiori ai limiti di legge per aree industriali. I terreni di risulta delle attività di perforazione infine sono stati

stoccati in sito in attesa di essere riutilizzati, entro il sito medesimo, come materiali di ritombamento.

Il campo prova è consistito nell'esecuzione delle seguenti attività:

- una prova di pompaggio a portata variabile (a gradini) eseguita in corrispondenza del pozzo pilota PW1, per valutare l'efficienza del pozzo medesimo;
- una prova di pompaggio a portata costante della durata di 48 ore per la determinazione della trasmissività e della conducibilità idraulica dell'acquifero.

Le acque di pompaggio emunte nel corso delle prove sono state conferite nella rete di stabilimento e riutilizzate in sito, come da protocollo del Campo Prove presentato nel Giugno 2008.

Durante l'esecuzione delle prove è stato eseguito il campionamento dell'acqua di falda estratta dal pozzo PW1, per determinare il tenore dei composti d'interesse, al fine di verificare la possibilità di riutilizzo dell'acqua estratta nel ciclo produttivo dello stabilimento e per la verifica di conformità con i limiti di scarico in fognatura/corso d'acqua superficiale.

I campioni di acque sono stati prelevati secondo la seguente sequenza:

- prova di pompaggio a gradini: un campione all'inizio della prova e un campione al termine di ciascun gradino di portata;
- prova di pompaggio a portata costante: un campione all'inizio della prova, uno dopo 8 h, uno dopo 24 h e uno al termine della prova.

I risultati delle analisi di laboratorio sono riportati in *Allegato D* e mostrano il superamento delle CSC previste dal D.Lgs. 152/06 per le acque di falda, relativamente a Arsenico e Ferro (cfr. § 3.4). Gli esiti delle analisi di laboratorio effettuate mostrano inoltre la conformità delle acque emunte per il recapito sia in corpo idrico superficiale che in fognatura, ai sensi dello stesso D.Lgs. 152/2006.

3.3 RISULTATI DELLE PROVE DI POMPAGGIO

3.3.1 Scopo delle prove

Le prove idrauliche eseguite hanno avuto lo scopo di valutare:

- l'efficienza del pozzo pilota PW1;
- la trasmissività e la conducibilità idraulica dell'acquifero;
- le caratteristiche qualitative delle acque estratte dal pozzo pilota PW1 in funzione della sua portata e del tempo di emungimento.

Per la realizzazione delle prove sono stati eseguiti tra Luglio e Ottobre 2008 un pozzo pilota e due piezometri di monitoraggio in prossimità dello spigolo Sud-Ovest dello stabilimento (*Allegato A*). In *Allegato B1* se ne riportano le stratigrafie, mentre di seguito si descrivono le principali caratteristiche costruttive:

- pozzo pilota PW1, perforato a percussione con diametro decrescente verso il basso da $\varnothing = 1\ 020$ mm a $\varnothing = 600$ mm fino alla profondità di 100 m dal p.c., attrezzato con tubazione in acciaio verniciato $\varnothing = 6''$ dotata di filtri di tipo *Johnson* tra 30m e 65m, tra 74m e 77m e tra 81m e 99 m da p.c.
- piezometro MW21, eseguito a carotaggio continuo con diametro $\varnothing = 152$ mm fino alla profondità di 100 m dal p.c., attrezzato con tubazione in PVC $\varnothing = 3''$ microfessurata tra 30 e 100 m dal p.c.
- piezometro MW1 bis, eseguito mediante perforazione a distruzione di nucleo con aria compressa con diametro $\varnothing = 152$ mm fino alla profondità di 100 m dal p.c. in corrispondenza del piezometro MW1 preesistente, avente profondità $h = 40$ m. Il piezometro MW1bis è stato attrezzato con tubazione in PVC $\varnothing = 3''$, microfessurata dalla profondità di 30 m fino a fondo foro.

Per l'esecuzione del pozzo è stato utilizzato un impianto a rotopercussione costituito da una torre di perforazione attrezzata con una puleggia all'interno della quale scorre una fune per il tiro e la caduta di una sonda dentata a cucchiaia, assicurato all'estremità superiore da un'asta pesante munita di snodo.

La sonda è stata manovrata alternativamente in caduta libera e in risalita, permettendo la frantumazione del terreno al fondo del perforo. La perforazione è stata eseguita a secco. I detriti derivanti dalla perforazione sono stati rimossi dalla sonda a cucchiaia, provvista sul fondo di una valvola di fondo a ciabatta. Inoltre, la scelta di una perforazione a percussione, in assenza di fluidi di perforazione, è stata motivata sia dall'accessibilità e logistica dell'area di lavoro che dall'esigenza di garantire la completa efficienza del pozzo al termine dell'installazione, anche con uno sviluppo limitato nel tempo.

Per consentire di tenere aperto il perforo durante le fasi di esecuzione del pozzo, sono state installate, mediante una morsa giracolonne idraulica, delle tubazioni di rivestimento in lamiera calandrata. La perforazione è stata eseguita con diametro decrescente procedendo verso il basso, da $\varnothing = 1\ 020$ mm e installando a cannocchiale tubazioni di rivestimento con $\varnothing = 820$ mm e, successivamente, $\varnothing = 600$ mm.

3.3.3 Esecuzione e Risultati delle Prove Pilota

Misure Piezometriche

Il 12 Ottobre 2008, prima dell'attivazione del campo prove, è stata eseguita una campagna di misure piezometriche presso i piezometri dello stabilimento, al fine di rilevare dati aggiornati relativi all'altezza piezometrica, alla direzione di flusso e al gradiente idraulico della falda. I dati sono riassunti nella tabella seguente (Tabella 3.2).

Tabella 3.2 Misure piezometriche 12 Ottobre 2008

Piezometro	Quota di riferimento (m s.l.m.)	Soggiacenza (m)	Quota piezometrica (m s.l.m.)
MW02	219.43	35.31	184.12
MW03	219.89	36.12	183.77
MW04	220.54	35.76	184.78
MW05	220.96	36.05	184.91
MW06	222.49	34.28	188.21
MW07	220.58	35.15	185.43
MW10	220.40	35.50	184.90
MW11	220.24	35.55	184.69
MW14	219.91	35.55	184.36
MW15	219.65	35.34	184.31
MW16	219.69	35.66	184.03
MW17	220.98	34.92	186.06
MW18	220.63	34.82	185.81
MW19	221.28	34.53	186.75
MW20	222.20	34.45	187.75

Per motivi logistici o di accessibilità, non è stato possibile effettuare in tale data la misurazione del livello piezometrico in corrispondenza dei piezometri MW8, MW9, MW12, MW13.

La carta piezometrica è stata interpolata con un *kriging* lineare mediante il software *Surfer ver. 8.05 (Allegato A)*.

La direzione di flusso è risultata invariata rispetto alla precedente misura di Marzo 2008 e il gradiente idraulico è risultato pari a $i = 0,00583$.

Prova di Pompaggio a Gradini

Il 15 Ottobre 2008 è stata eseguita presso il pozzo pilota PW1 una prova di pompaggio a gradini per valutare l'efficienza del pozzo stesso e per definire la portata della successiva prova di pompaggio a portata costante di lunga durata.

La prova è stata eseguita tramite elettropompa sommersa KSB BPH 384/5 con motore 9A 373/2 da 37 kW collegata ad una linea provvisoria per il recapito delle acque emunte alla rete idrica di stabilimento. La regolazione della portata è stata eseguita agendo sulla saracinesca installata sulla tubazione di mandata.

La prova è stata condotta realizzando 4 gradini a portata crescente pari a $Q = 28,5, 51,6, 79,5$ e $102,0 \text{ m}^3/\text{h}$ della durata di 45 minuti circa ciascuno, per una durata complessiva della prova di circa 3,5 ore. La soggiacenza della falda è stata misurata in pozzo mediante sonda freaticometrica inserita nell'apposito tubo guida da $\frac{3}{4}$ " (*Allegato E*). Al fine di registrare con precisione le coppie di dati tempo/abbassamento piezometrico per ciascun gradino sono state eseguite oltre 130 misure di soggiacenza, con frequenza più elevata all'inizio di ciascun gradino e via via più diradate man mano che il livello piezometrico si stabilizzava.

Interpretazione della Prova

La prova è stata interpretata sia con il metodo di *Jacob* (*Jacob, 1947*) che con il metodo di *Eden & Hazel* (*Eden & Hazel, 1973*), che hanno consentito di valutare la portata critica del pozzo, l'efficienza in funzione della portata emunta (*Allegato E*) e di avere una stima preliminare della trasmissività dell'acquifero.

In sintesi, secondo *Jacob* l'abbassamento piezometrico misurato in pozzo è dato dalla somma delle perdite di carico in falda e di quelle in pozzo, di cui queste ultime considerate proporzionali al quadrato della portata [2.1]:

$$s_w = BQ + CQ^2 \quad [2.1]$$

dove:

- Q = portata del gradino;
- C = coefficiente angolare della retta d'interpolazione dei dati abbassamento specifico/portata;
- B = intercetta della retta d'interpolazione dei dati abbassamento specifico/portata.

L'efficienza del pozzo è data dal rapporto tra le perdite di carico in falda e le perdite di carico totali [2.2]:

$$WE = \frac{BQ}{BQ + CQ^2} \quad [2.2]$$

Secondo il metodo di *Eden & Hazel* l'abbassamento piezometrico in pozzo durante l' n -esimo gradino della prova è dato dalla seguente equazione:

$$s_{w(n)} = aQ_n + bH_n + CQ_n^2 \quad [2.3]$$

dove:

$$\bullet \quad a = \frac{2,3}{4\pi T} \log \frac{2,25T}{r^2 S} \quad [2.4]$$

$$\bullet \quad b = \frac{2,3}{4\pi T} \quad [2.5]$$

$$\bullet \quad H_n = \sum_{i=1}^n \Delta Q_i \log(t - t_i) \quad [2.6]$$

- T = trasmissività dell'acquifero
- S = coefficiente di immagazzinamento dell'acquifero

- r = raggio del pozzo
- t = tempo dall'inizio della prova
- t_i = tempo d'inizio dell'i-esimo gradino

L'efficienza del pozzo è data dalla [2.7]:

$$WE = \frac{aQ_n + bH_n}{aQ_n + bH_n + CQ_n^2} \quad [2.7]$$

Con entrambi i metodi le perdite di carico in pozzo sono considerate dipendenti dal quadrato della portata del pozzo, ma, mentre il metodo di *Jacob* richiede soltanto il dato di abbassamento piezometrico al termine di ciascun gradino, il metodo di *Eden & Hazel* permette di utilizzare un numero molto più elevato di dati e di eseguire quindi un'interpretazione più affidabile. Come il metodo di *Theis*, da cui deriva, per l'applicazione del metodo di *Eden & Hazel* al caso di un acquifero libero è necessario sostituire all'abbassamento piezometrico s_w misurato in pozzo l'abbassamento corretto s_w' [2.8]:

$$s_w' = s_w - \frac{s_w^2}{2D} \quad [2.8]$$

dove:

s_w = abbassamento piezometrico misurato in pozzo

s_w' = abbassamento piezometrico corretto

D = spessore saturo dell'acquifero

La *Tabella 3.3* riporta in sintesi gli abbassamenti piezometrici misurati al termine di ciascun gradino mentre i dati completi della prova sono riportati in *Allegato E*. In *Tabella 3.4* sono riportati i parametri derivanti dall'interpretazione della prova con i due metodi, eseguita mediante il software *AquiferWin32 v. 2,27* prodotto da *Environmental Simulations, Inc.*

Tabella 3.3 *Prova di Pompaggio a Gradini*

Gradino	Tempo (min)	Portata (m ³ /h)	Abbassamento piezometrico in pozzo (m)	Efficienza (<i>Jacob</i>)	Efficienza (<i>Eden & Hazel</i>)
1	46,07	28,46	0,74	0.79	0.84
2	91,35	51,60	1,42	0.75	0.80
3	136,00	79,50	2,58	0.64	0.59
4	207,90	102,00	3,73	0.56	0.51

Tabella 3.4 *Risultati Interpretazione Prova a Gradini*

Metodo / Parametri	Valore
<i>Jacob</i>	
A (h/m ²)	0,02061
B (h ² /m ⁵)	0,00015
<i>Eden & Hazel</i>	

Metodo / Parametri	Valore
a (h/m ²)	0,00938
B (h/m ²)	0,00355
C (h ² /m ⁵)	0,00013
T (m ² /s)	0,01432

Con entrambi i metodi di interpretazione, **la portata critica del pozzo può essere valutata in circa Q= 60 m³/h**. Al di sotto della portata critica l'efficienza del pozzo presenta valori piuttosto elevati e compresi tra circa 0,85 e 0,75, mentre a portate maggiori l'efficienza scende fino a valori di circa 0,5 alla portata corrispondente all'ultimo gradino della prova.

Il coefficiente di perdita di carico in pozzo calcolato con i due metodi è molto simile ed è pari a 0,00015 h²/m⁵ con il metodo di *Jacob* e a 0,00013 h²/m⁵ con il metodo di *Eden & Hazel*.

La trasmissività dell'acquifero, valutata col metodo di *Eden & Hazel*, è pari a T= 0,01432 m²/s, cui corrisponde una conducibilità idraulica K= 2,4 x 10⁻⁴ m/s pari a 20,91 m/giorno, considerando lo spessore saturo D= 59,15 m al termine della prova.

Prova di Pompaggio a Portata Costante

La prova di pompaggio a portata costante è stata eseguita nei giorni 15 e 16 Ottobre 2008 attivando il pozzo PW1 alla portata media di 108,12 m³/h per un tempo complessivo di 48 ore e monitorando l'abbassamento piezometrico presso i piezometri MW21 e MW1 bis, ubicati ad una distanza rispettivamente di 21 m e 12 m dal pozzo PW1.

Le misure di livello nei piezometri sono state eseguite manualmente mediante l'utilizzo di un freatimetro in ciascun piezometro (cfr. *Allegato E*). Le curve tempo/abbassamento piezometrico misurate presso i piezometri presentano una discesa del livello piezometrico piuttosto regolare durante l'esecuzione della prova.

Essendo l'acquifero in questione di tipo libero, i dati della prova sono stati interpretati con il metodo di *Neuman* (*Neuman, 1972*) per determinare la trasmissività (T), la conducibilità idraulica (k), l'immagazzinamento specifico (S_s) e la porosità efficace (S_y) dell'acquifero (*Tabella 3.5*).

Tabella 3.5 Risultati Prova di Pompaggio a Portata Costante

Parametro	Risultati MW21	Risultati MW1 bis	Media
T (m ² /s)	0,0124	0,0100	0,0112
K _r (m/s)	1,94 x 10 ⁻⁴	1,57 x 10 ⁻⁴	1,755 x 10 ⁻⁴
S _s (-)	0,0125	0,0079	0,0102
S _y (-)	0,1626	0,2710	0,2168

L'interpretazione dei risultati ottenuti presso i due piezometri fornisce valori dei parametri idrogeologici dell'acquifero abbastanza simili, il che conferma la buona riuscita della prova. La conducibilità idraulica media calcolata con i dati dei due piezometri è $K = 1,775 \times 10^{-4}$ m/s pari a 15,33 m/giorno.

Il valore di conducibilità ottenuto con la prova di pompaggio a portata costante è inferiore di circa il 25% rispetto a quello ottenuto con la prova di pompaggio a gradini interpretata col metodo di *Eden & Hazel*, ma, essendo la prova di pompaggio pozzo-piezometro specificamente progettata per la definizione della trasmissività dell'acquifero, per la definizione iniziale del valore di conducibilità idraulica da inserire nel modello di flusso è stato utilizzato il valore ottenuto con tale prova.

3.4

CARATTERISTICHE CHIMICHE DELLE ACQUE DI EMUNGIMENTO

Durante l'esecuzione delle prove di pompaggio è stato eseguito il campionamento dell'acqua di falda estratta dal pozzo PW1, allo scopo di determinare il tenore dei composti d'interesse, definire le caratteristiche idrochimiche dell'acqua captata, verificare la possibilità di riutilizzo dell'acqua estratta nel ciclo produttivo dello stabilimento e, infine, verificare della conformità rispetto ai limiti di scarico in fognatura e corso d'acqua superficiale.

I campioni di acque sono stati prelevati secondo la seguente sequenza:

- prova di pompaggio a gradini: un campione all'inizio della prova e un campione al termine di ciascun gradino di portata;
- prova di pompaggio a portata costante: un campione all'inizio della prova, uno dopo 8 h, uno dopo 24 h e uno al termine della prova.

In sintesi, le analisi chimiche effettuate hanno evidenziato i seguenti risultati (cfr. *Allegato D*):

- gli andamenti dei parametri chimico fisici nel tempo sono, con poche eccezioni, abbastanza regolari e i trend osservati durante la prova a portata costante rappresentano in genere la prosecuzione di quelli osservati durante la prova a gradini;
- durante la prova a gradini si assiste ad un aumento dei solidi sospesi totali all'aumentare della portata, probabilmente a causa dell'aumento della velocità e/o della turbolenza dell'acqua tra i filtri del pozzo e, di conseguenza, del trascinamento di particelle fini. Con la successiva prova a portata costante i solidi sospesi aumentano inizialmente per poi diminuire drasticamente già dopo 8 ore dall'avvio del pompaggio, probabilmente a seguito dell'assestamento del dreno;
- la conducibilità elettrica diminuisce progressivamente tra circa 860 e 830 mV, tra l'inizio della prova a gradini e il termine della prova a portata costante;
- la durezza totale aumenta progressivamente nel tempo, sia durante la prova a gradini che durante quella a portata costante; ciononostante, il

pH dell'acqua rimane pressoché costante durante le prove, oscillando tra circa 7,7 e 7,8;

- il potenziale redox scende progressivamente, passando da circa 150 mV a circa - 120 mV. Parallelamente la concentrazione di Ossigeno disciolto scende da circa 5,5 a circa 3-4 mg/l;
- le concentrazioni di arsenico diminuiscono progressivamente, passando da circa 60 µg/l a poco più di 40 µg/l;
- Ferro e Manganese presentano un trend opposto, con tendenza all'aumento delle concentrazioni tra l'inizio della prova a gradini e la fine della prova a portata costante. In particolare, il Ferro aumenta, anche se in modo non continuo, passando da circa 5 µg/l a circa 10 µg/l, mentre la concentrazione di Manganese sale da circa 350 µg/l a poco più di 550 µg/l. Le concentrazioni rilevate risultano in ogni caso di molto inferiori al limite massimo ammissibile per lo scarico in corso idrico superficiale e fognatura che, sia per Ferro che per Manganese risultano pari a rispettivamente, 2.000 µg/l e 4.000 µg/l).
- le Aldeidi totali non presentano un trend univoco, ma oscillano tra circa 18 e 28 µg/l, a fronte di un limite per lo scarico in fognatura pari a 2.000 µg/l e di un limite per lo scarico in corso d'acqua superficiale pari a 1.000 µg/l; per quanto attiene specificamente le concentrazioni di Formaldeide ed Acetaldeide (determinate singolarmente come sostanze di interesse), si rileva come per la Formaldeide le concentrazioni rilevate varino tra 0,03 µg/l e 4,64 µg/l mentre per la Acetaldeide queste varino tra 0,01 µg/l e 0,29 µg/l.
- la Pentaeritrite aumenta inizialmente da circa 340 µg/l a 400 µg/l, per poi diminuire durante la prova a gradini fino a circa 320 µg/l.
- la Melamina presenta concentrazioni sempre al di sotto del limite di rilevabilità pari a 3,93 µg/l.

Arsenico e Manganese sono gli unici composti che presentano concentrazioni superiori alle rispettive Concentrazioni Soglia di Contaminazione per le acque sotterranee ai sensi del D.Lgs. 152/2006.

Le acque emunte risultano idonee per lo scarico sia in corpo idrico superficiale che in fognatura, ai sensi del D.Lgs. 152/2006.

3.5

MODELLO CONCETTUALE IDROGEOLOGICO

Il modello concettuale può essere così sintetizzato:

- Quota media dell'insediamento in m s.l.m. circa pari a 220 m s.l.m.
- presenza di un acquifero non confinato (Acquifero Tradizionale) fino a 100-110 m dal p.c.;
- acquifero saturo costituito prevalentemente da ghiaie fino a circa 50-55 m dal p.c., da sabbie e ghiaie in matrice limosa da 50-55 a 80-85 m dal p.c. e ancora da ghiaie da 80-85 a 100-110 m dal p.c.;
- base dell'Acquifero Tradizionale costituita da argille e limi di origine marina con elevata continuità laterale e spessore complessivo variabile da 60 a 100 m circa;

- presenza nello stabilimento di 11 pozzi per acqua con filtri collocati nell'Acquifero Tradizionale e nell'Acquifero Profondo (variabilmente da pozzo a pozzo), per la copertura del fabbisogno idrico del Polo Chimico.
- presenza di una contaminazione da Ferro e Arsenico associabile alla biodegradazione dei composti organici sito specifici Pentaeritrite, e, in minor misura, Formaldeide e Acetaldeide nel settore Sud-Occidentale dell'insediamento;
- presenza di una contaminazione da Manganese non direttamente associabile alla presenza di processi degradativi nel settore Sud-Orientale dell'insediamento;
- presenza di concentrazioni più elevate di Melamina nel settore Centro-Meridionale dello stabilimento, non associabile a evidenti processi di biodegradazione.

4 **PROGETTAZIONE DELLA BARRIERA IDRAULICA**

4.1 **CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLA BARRIERA IDRAULICA**

Il presente capitolo include la definizione progettuale di una barriera idraulica, finalizzata al confinamento idrodinamico della porzione di valle del Polo Chimico multi societario di Castellanza ed Olgiate Olona, interessata da concentrazioni di Arsenico nelle acque di falda superiori alla CSC prevista dal D.Lgs. 152/06 (pari a 10 µg/l).

La definizione del fronte di barrieramento è stata effettuata sulla base dei dati idrochimici acquisiti nel corso delle campagne di monitoraggio della falda effettuate nel 2007 e 2008.

Le attività di dimensionamento e progettazione dell'opera si sono basate sui dati sperimentali acquisiti nel corso delle attività di caratterizzazione ed in particolare del Campo Prove di cui al § 3.

Di seguito si riportano in dettaglio le elaborazioni effettuate per il dimensionamento dell'opera ed i contenuti progettuali delle soluzioni previste.

4.2 **MODELLO DI FLUSSO PER IL DIMENSIONAMENTO DEL SISTEMA DI CONTENIMENTO IDRAULICO**

4.2.1 **Introduzione**

Nel presente capitolo è riportato il dimensionamento del sistema di contenimento idraulico, sulla base dei risultati di un modello analitico di flusso in 2D.

Tale modello ha permesso di simulare il comportamento dell'acquifero in condizioni dinamiche e di dimensionare il sistema di contenimento idraulico, al fine di impedire la migrazione del plume di Arsenico a valle del Sito.

Nei seguenti paragrafi sono illustrati:

- il codice di calcolo impiegato;
- i dati di input impiegati;
- il risultato delle simulazioni previsionali, con la definizione del sistema di contenimento idraulico.

4.2.2 **Codice di Calcolo**

Per la modellazione bidimensionale del flusso di falda è stato utilizzato il software *WinFlow ver. 1.07* della *Environmental Simulations Inc.*

Il modello utilizza le equazioni analitiche sviluppate da *Strack* (1989) per simulare gli effetti degli elementi idrogeologici potenzialmente presenti nell'acquifero, come pozzi, aree di ricarica/prelievo circolari, sorgenti lineari o puntuali. Il modello permette di simulare acquiferi liberi, confinati o semiconfinati.

4.2.3 *Dati in Ingresso*

Il modello realizzato è in regime stazionario ed è stato sviluppato utilizzando i seguenti dati, derivanti dall'interpretazione della prova di pompaggio a portata costante (cfr. § 3.3.3), dalle stratigrafie dei pozzi e piezometri dello stabilimento e dalla piezometria dell'Ottobre 2008:

- conducibilità idraulica $k = 1,755 \times 10^{-4}$ m/s
- porosità efficace $n_e = 0,216$
- quota top acquifero = 320 m s.l.m. (teorico di modello)
- quota base acquifero = 120 m s.l.m.
- direzione di flusso = NO-SE (115° N)
- quota di riferimento piezometrico = 189,95 m s.l.m.
- gradiente idraulico $i = 5,83 \times 10^{-3}$

In particolare, la conducibilità idraulica inserita inizialmente nel modello è quella derivante dall'interpretazione della prova di pompaggio a portata costante. Tale valore è stato modificato in seguito alla calibrazione e alla verifica del modello.

La quota del top dell'acquifero è stata posta pari a 320 m s.l.m., valore superiore alla quota del piano campagna, in modo da simulare la condizione di acquifero libero e da permettere la libera oscillazione del livello piezometrico in seguito all'attivazione del pompaggio.

Il gradiente idraulico e la direzione di flusso della falda sono state calcolate sulla base della piezometria statica misurata a Ottobre 2008 (cfr. § 3.3.3).

Il punto riferimento per la definizione del carico idraulico della falda (*Reference Head*) è stato ubicato 300 m a monte del piezometro MW06 e la sua quota piezometrica è stata calcolata sommando alla quota piezometrica misurata presso MW06 (188,21 m s.l.m.) il dislivello piezometrico calcolato sulla base del gradiente idraulico, vale a dire $\Delta h = 300 \text{ m} \times 5,83 \times 10^{-3} = 1,74 \text{ m}$.

4.2.4 *Calibrazione del Modello*

Il modello di flusso è stato calibrato utilizzando come *target* o obiettivo di calibrazione i dati piezometrici misurati il 12 Ottobre 2008, verificando quindi la differenza tra livello piezometrico misurato e calcolato e agendo sui parametri in *input* al modello in modo da minimizzare gli scarti (cfr. *Tabella 4.1*).

Tabella 4.1 Scarti Modello Calibrato

Piezometro	Scarto (m)
MW02	0,05
MW03	0,01
MW04	0,04
MW05	-0,03
MW06	-0,29
MW07	-0,08
MW10	0,03
MW11	-0,15
MW14	0,12
MW15	0,08
MW16	0,10
MW17	-0,03
MW18	0,05
MW19	-0,16
MW20	-0,21

Gli scarti ottenuti sono compresi tra 0,12 e -0,29 m, la media del valore assoluto degli scarti è di 0,09 m e il rapporto tra la deviazione standard degli scarti e la differenza piezometrica simulata nel modello è pari a solo 0,026, nettamente inferiore al limite di 0,1 comunemente accettato per considerare un modello ben calibrato (Tabella 4.2).

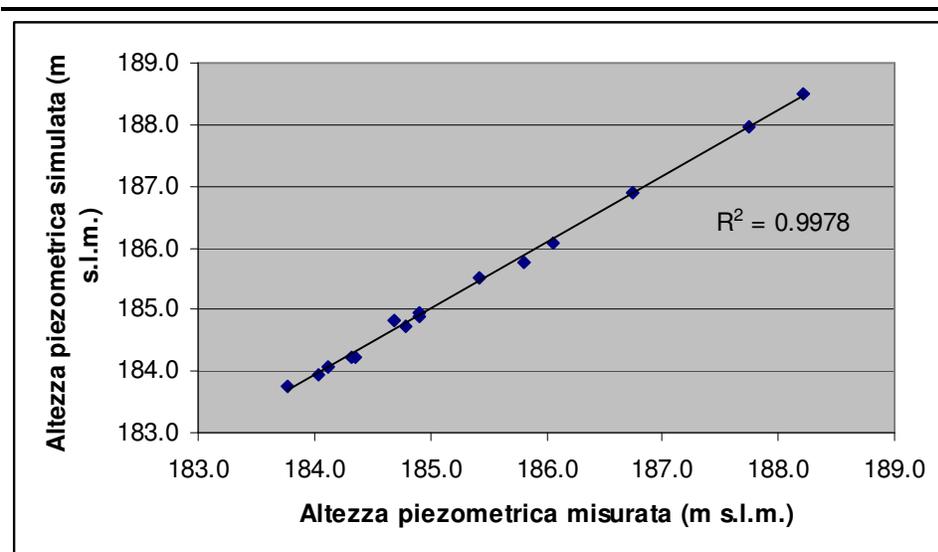
Tabella 4.2 Parametri Statistici di Calibrazione

Parametro	Valore
Media degli scarti	-0,031
Deviazione standard degli scarti	0,117
Somma dei quadrati degli scarti	0
Media del valore assoluto degli scarti	0,095
Scarto minimo	-0,291
Scarto massimo	0,116
Differenza piezometrica simulata	4,44
Deviazione standard/ differenza piezometrica simulata	0,026

Il grafico degli scarti presenta un ottimo allineamento dei punti lungo la retta teorica con inclinazione 45° (Figura 4.1), con un valore di r² della retta di interpolazione molto prossimo a 1.

La simulazione della piezometria statica è riportata in Allegato A – Figura 12.

Figura 4.1 Grafico di Calibrazione



4.2.5 Verifica del Modello

Il modello in condizioni statiche calibrato è stato verificato in condizioni dinamiche simulando la prova di pompaggio a portata costante (cfr. § 3.3.3) e confrontando l'abbassamento piezometrico misurato nei piezometri MW21 e MW1 bis, con i rispettivi abbassamenti piezometrici simulati.

Dato che con la prova non è stata raggiunta la stazionarietà dei livelli piezometrici presso i piezometri, gli abbassamenti piezometrici in condizioni stazionarie sono stati approssimativamente dedotti dall'osservazione dei grafici tempo/abbassamento (*Allegato E*).

La verifica ha determinato la necessità di un aumento della conducibilità idraulica inserita nel modello dal valore iniziale di $1,755 \times 10^{-4}$ m/s a $2,7 \times 10^{-4}$ m/s (*Tabella 4.3*).

Tabella 4.3 Verifica in Condizioni Dinamiche

Piezometro	Abbassamento piezometrico misurato (48 h) (m)	Stima abbassamento piezometrico in regime stazionario (m)	Abbassamento piezometrico simulato (m)
MW21	0,84	circa 1	1,07
MW1 bis	1,08	circa 1,2	1,24

Con una conducibilità idraulica pari a $2,7 \times 10^{-4}$ m/s, il modello di flusso simula in modo corretto sia il reticolo di flusso in condizioni statiche che l'abbassamento piezometrico indotto nelle condizioni dinamiche relative alla prova di pompaggio a portata costante, per cui il modello è stato considerato affidabile e utilizzato per eseguire le simulazioni previsionali.

4.2.6 *Definizione del Sistema di Contenimento Idraulico*

Partendo dal modello calibrato e verificato, sono state eseguite alcune simulazioni di previsione con lo scopo di definire il numero, l'ubicazione e la portata dei pozzi necessari per il contenimento idraulico del plume di Arsenico presente nelle acque di falda dell'area di studio.

Le simulazioni sono state condotte considerando alcuni scenari con un differente numero di pozzi.

Lo scenario ritenuto ottimale consiste nell'attivazione di 7 pozzi, di cui uno (PW1) esistente e sei da realizzare, allineati lungo il confine meridionale dell'insediamento, con una portata unitaria pari a circa $Q_i = 29 \text{ m}^3/\text{h}$, per una portata totale del sistema di $Q = 202 \text{ m}^3/\text{h}$ (cfr. *Allegato A*, §§ da 4.3 a 4.6).

Tale configurazione è pertanto quella che sarà utilizzata per il dimensionamento iniziale del sistema di Messa in Sicurezza Operativa.

Si evidenzia come tale dimensionamento sia basato sui dati acquisiti nel corso del Campo Prove eseguito ad Ottobre 2008, con riferimento alle condizioni attuali del sito.

È plausibile che eventuali interventi futuri di manutenzione delle linee di distribuzione delle acque di pozzo ed antincendio di stabilimento, potenzialmente interessate da perdite localizzate o diffuse delle acque (configurabili come fenomeni di ricarica dell'acquifero), possano modificare le condizioni di flusso nell'area di studio con una riduzione, anche sensibile, delle portate di emungimento necessarie per il confinamento idraulico. Tale eventualità renderà evidentemente necessaria una rivisitazione del dimensionamento dell'opera, con particolare riguardo alla portata di emungimento, che potrà essere rivista a seguire, anche a seguito di nuove indagini dirette e successive rielaborazioni dei dati acquisiti.

4.3 *UBICAZIONE POZZI E DIMENSIONAMENTO PORTATE*

I pozzi saranno allineati lungo il confine Sud-Occidentale dell'area, distanziati di circa 35-40 m l'uno dall'altro, nel settore di stabilimento compreso tra il pozzo pilota PW1 e lo spigolo Orientale dell'impianto abbattimento polveri, posto di fronte al reparto collanti ureici solidi (cfr. *Allegato A – Figura 13 e Figura 14*).

La portata da estrarre da ciascun pozzo per sbarrare il flusso di falda, sulla base del risultato del modello di flusso eseguito, è circa $Q_i = 29 \text{ m}^3/\text{h}$, per una portata totale del sistema di circa $Q = 202 \text{ m}^3/\text{h}$. Per l'acqua di emungimento è prevista l'immissione nella rete acque di stabilimento, mediante la realizzazione di connessioni idrauliche, la cui progettazione di dettaglio non è inclusa nel presente documento.

La prevalenza della pompa, necessaria a vincere il dislivello piezometrico dinamico e le perdite di carico concentrate e distribuite lungo la tubazione di mandata, è prudenzialmente stimata in 75 m. Tale valore tiene conto della previsione di conferimento delle acque di emungimento, che identifica la rete acque di stabilimento (in pressione) come il recapito delle acque di barriera a fini di un loro riutilizzo nei cicli produttivi (cfr. § 4.8).

4.4 STRATIGRAFIA PRESUNTA

Sulla base delle informazioni stratigrafiche desunte dei pozzi e dei piezometri presenti in stabilimento e delle sezioni idrogeologiche di dettaglio realizzate, la stratigrafia presunta dei pozzi barriera è la seguente:

Tabella 4.4 Stratigrafia di Massima Pozzi Barriera

Profondità (m da p.c.; da / a)	Litologia
0 / 0,2	pavimentazione
0,2 / 18-19	ghiaie e sabbie prevalenti
18-19 / 25	ghiaie e sabbie limose
25 / 55-60	ghiaia prevalente
55-60 / 80-85	sabbie e ghiaie limose
80-85 / 100	ghiaie prevalenti

4.5 CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE POZZI

Preliminarmente all'avvio delle attività di perforazione, ogni postazione sarà interessata da prescavi fino ad una profondità compresa tra 1,3 m e 2,3 m da p.c., al fine di escludere eventuali interferenze con sottoservizi. I prescavi saranno effettuati con miniescavatore ed avranno una larghezza minima pari ad 1 m (cfr. *Figura 15*).

I pozzi saranno realizzati a distruzione di nucleo mediante perforazione a rotazione con circolazione inversa di fluidi costituiti da miscela acqua-bentonite diluita con diametro di perforazione $d=450$ mm, perforando dal piano campagna fino alla profondità di 100 m dal p.c. (cfr. *Figure 14, 15*)

I pozzi presenteranno una tubazione in acciaio al carbonio verniciato con diametro $d=219$ mm e spessore $s=5$ mm, indicativamente con tratti ciechi negli intervalli di profondità 0m-30m, 60m-72m, 78m-84m e 96m-100 m da p.c. Le profondità dei tratti ciechi e filtrati potrà subire delle variazioni in corso d'opera sulla base delle indicazioni stratigrafiche ottenute durante la perforazione di ciascun pozzo.

I filtri saranno del tipo a ponte con luce $4 \times 40 \times 1,5$ mm nell'intervallo di profondità 30m-60 m dal p.c. e luce $4 \times 40 \times 0,7$ mm negli intervalli di profondità di 72m-78m e 84m-96 m dal p.c. Per migliorare la permeabilità nelle immediate vicinanze dell'opera e favorire la captazione dell'acqua di

falda, ai filtri verrà giustapposto un manto drenante artificiale formato da ghiaino siliceo a granulometria calibrata su quella dell'acquifero $d= 4-6$ mm da 29 a 61 m dal p.c. e $d= 3-4$ mm da 71 a 79 e da 83 a 96 m dal p.c. il dreno verrà posato per gravità nell'intercapedine tra la colonna e la parete del pozzo avendo cura di non formare ponti o altre soluzioni di continuità.

Per l'isolamento dei tratti ciechi verrà postata a gravità argilla sferoidale disidratata di tipo 'Compactonit' alle profondità di 27-29, 61-71, 79-83 e 97-100 m da p.c., mentre per garantire l'isolamento del tratto sommitale e impedire l'infiltrazione d'acqua dalla superficie verrà messa in opera una cementazione con boiaccia cemento-bentonite 2-3 % tra 0 e 27 m dal p.c.

I pozzi saranno dotati di camera d'avampozzo interrata in cls. prefabbricato o posato in opera con dimensioni $L= 2$ m, $l= 1$ m, $h= 1,2$ m, h utile all'intradosso 1,0 m, dotata di chiusino carrabile in ghisa per consentire l'estrazione dell'elettropompa sommersa durante le operazioni di manutenzione e di un passo d'uomo, anch'esso con chiusino carrabile in ghisa. La colonna di ciascun pozzo verrà tagliata in opera dopo il completamento dei pozzi e lo scavo per la posa della camera d'avampozzo e sposterà di 0,5 m dal piano di calpestio della soletta.

I pozzi saranno sviluppati mediante air-lift eseguito con impianto ad aria compressa o mediante pistonaggio di tutti i tratti fenestrati e successivamente mediante pompaggio prolungato almeno per 48 ore a portata crescente, in modo da determinare una disposizione graduata dei grani di dreno nello spazio anulare, tra la tubazione del pozzo e il bordo del perforo, e nella frazione di acquifero immediatamente vicina al pozzo, rompendo gli eventuali "ponti" che il terreno a grana fine tende a formare attorno al terreno a grana più grossa.

Il pompaggio per lo sviluppo dei pozzi avverrà mediante elettropompa sommersa di idonea portata, fornita provvisoriamente dall'impresa esecutrice delle perforazioni. Questa pompa verrà utilizzata anche per l'esecuzione di una prova di pompaggio a portata variabile ("a gradini") con almeno 4 gradini di portata (2 l/s, 5 l/s, 10 l/s, 15 l/s), per la definizione della curva caratteristica dei pozzi e la valutazione dell'efficienza delle opere (cfr. § 4.11).

4.6

CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE IMPIANTO DI SOLLEVAMENTO

In funzione delle portate di previsto emungimento, la pompa di prevista installazione in ciascun pozzo potrà essere del tipo Caprari E6S54 7A MAC617 – 8VC, con motore di potenza 13 kW (o similare), caratterizzata dalle seguenti coppie portata (m^3/h)/prevalenza (m): 32/50; 35/65; 40/80 e con un centro curva portata/efficienza a una portata di circa $30 m^3/h$. La bocca d'aspirazione sarà collocata alla profondità di 64 m dal p.c.

I pozzi saranno dotati di tubo guida $d= \frac{3}{4}$ " per l'esecuzione delle misure piezometriche, che avrà lo scopo di impedire l'inzeppamento della sonda del freatimetro nei cavi elettrici e di controllo della pompa.

I pozzi saranno dotati di quadro elettrico con inverter collegato elettronicamente ad un contatore ad induzione elettromagnetico, per la regolazione automatica della portata estratta da ciascun pozzo.

Tabella 4.5 *Caratteristiche della Pompa Tipo*

Tipo	Caprari E6S54 7A MAC617 – 8VC
Potenza nominale (kW)	13
Portata (m ³ /h)	32 / 35 / 40
Prevalenza (m)	50 / 65 / 80
Profondità di installazione dal piano campagna (m)	63
Diametro tubazione di mandata (")	3
Diametro di ingombro (mm)	143
Lunghezza (mm)	1912

L'impianto di sollevamento sarà composto da:

- tubazione montante flangiata acciaio verniciato o zincato $d= 3$ " ml 63;
- curva 90° flangiata in acciaio verniciato o zincato $d= 3$ " con attacco per manometro e per rubinetto di prelievo;
- manometro;
- rubinetto di prelievo;
- saracinesca con volantino con contro flange e giunto di smontaggio (o valvola a farfalla);
- contatore volumetrico o a induzione elettromagnetica con tronchetto di raccordo flangiato, per la misurazione della portata.
- Valvola di non ritorno

Il pozzo sarà attrezzato con sensori di livello minimo e massimo. La tubazione di mandata della pompa ed i cavi risaliranno il pozzo sino ad uscire dalla flangia di chiusura del controtubo di protezione. Sulla tubazione di mandata, saranno posti gli organi di misura (manometro, misuratore di portata elettromagnetico, rubinetto per il prelievo di campioni). Sullo stesso manufatto sarà installata la *junction box* per i cavi di alimentazione della pompa e per i cavi di segnale.

I cavi di potenza e di segnale (posati in *conduit* interrati) collegheranno il pozzo ad un quadro di azionamento e controllo che ne permetterà il funzionamento in modo automatico o manuale. Tale sistema permetterà altresì il blocco dell'impianto in caso di anomalie.

4.7

INDICAZIONI DI MASSIMA SULL'IMPIANTO DI REGOLAZIONE DI PORTATA

Il controllo e regolazione dei parametri della barriera idraulica sarà realizzato attraverso un quadro elettrico di azionamento e controllo dotato di apposito

PLC che consentirà l'automazione dell'impianto, attraverso la gestione delle seguenti funzioni:

- On/off pozzi sia in manuale che in automatico;
- regolazione delle portate delle elettropompe sommerse alloggiato nei pozzi;
- allarmi di blocco dell'impianto, tipo: assorbimento eccessivo delle pompe (termico), bassi livelli di acqua nei pozzi.

Le portate dei pozzi di emungimento saranno regolate dal quadro elettrico mediante appositi *inverter*, collegati elettronicamente ai misuratori di portata a induzione elettromagnetica. Gli *inverter* consentiranno la regolazione elettronica delle portate, attraverso la variazione della frequenza dei motori elettrici delle elettropompe sommerse, ottimizzandone in questo modo l'assorbimento elettrico, rispetto ad un sistema di controllo delle portate mediante semplice regolazione dell'apertura delle saracinesche montate a testa pozzo.

Il pannello operatore del PLC consentirà il comando di tutte le apparecchiature e la regolazione dei parametri di funzionamento dell'impianto.

In particolare, saranno visualizzati i seguenti parametri:

- portate istantanee dei pozzi di emungimento;
- allarmi di blocco dell'impianto.

Verrà in ogni caso valutata da *Chemisol* la possibilità di sostituire un sistema di regolazione automatica delle portate dei pozzi con un sistema di regolazione manuale delle stesse.

4.8 CRITERI DI GESTIONE DELLE ACQUE

Il Polo Chimico multi societario di Castellanza - Olgiate Olona è dotato di rete fognaria interna allo stabilimento, collegata all'impianto di trattamento di stabilimento, il quale recapita a sua volta in pubblica fognatura e, tramite questa, all'impianto di trattamento consortile.

Sulla base delle attività di indagine condotte nell'ambito della caratterizzazione delle aree ex-AMI e del Campo Prove di cui al § 3.2 e sulla base degli esiti degli accertamenti analitici condotti in corso di prova (cfr. § 3.4) sulle acque emunte dal pozzo pilota PW1 (collocato nell'area caratterizzata da maggiore impatto sulle acque di falda), si evidenzia come le acque di falda di previsto emungimento sul fronte della barriera idraulica in progetto risultino conformi ai limiti previsti sia per lo scarico in fognatura che per il conferimento in corso d'acqua superficiale, ai sensi del D.Lgs. 152/06.

4.8.1 *Fase di Installazione della Barriera*

I fluidi di perforazione saranno prodotte tramite approvvigionamento di acque della rete acque di pozzo dello stabilimento ed eventuale arricchimento con bentonite, per il sostegno del perforo in corso di perforazione.

Nell'ambito delle attività di installazione della barriera idraulica, dovranno essere gestite le seguenti tipologie di acque reflue:

1. I fluidi di perforazione, eventualmente arricchite in bentonite ed impiegate per l'avanzamento della perforazione;
2. Acque di sviluppo e spurgo dei pozzi barriera.

I fluidi di perforazione verranno fatte circolare in un sistema chiuso costituito dal perforo e dalle vasche di decantazione, per mezzo del sistema di circolazione dei fluidi azionato tramite la sonda di perforazione.

In corrispondenza delle vasche di circolazione e sedimentazione, i fluidi di perforazione saranno progressivamente alleggeriti dei terreni di risulta della perforazione, mediante la meccanica decantazione dei fanghi di risulta in apposita vasca (cfr. § 4.9).

I fluidi di perforazione, arricchite in bentonite, saranno riutilizzate sia nel corso della perforazione di un singolo pozzo che al passaggio dalla perforazione di un pozzo ad un altro, previo stoccaggio temporaneo nelle vasche di sedimentazione.

Le acque, chiarificate per decantazione dei fanghi di perforazione, saranno conferite nella fognatura di stabilimento, mentre i fanghi ispessiti saranno smaltiti ai sensi di legge. La quantità esatta di fanghi impiegati e, pertanto, da smaltire verrà definita in corso d'opera sulla base delle esigenze operative dell'impresa di perforazione. A puro titolo indicativo, è prevista la produzione di 120 tonnellate di fanghi bentonitici.

Le acque di sviluppo dei pozzi saranno gestite come segue:

- le prime acque di sviluppo, caratterizzate dalla maggiore presenza di solidi in sospensione, saranno stoccate temporaneamente in vasca e fatte decantare. Le acque chiarificate così prodotte saranno conferite nella fognatura di stabilimento, mentre il sedimento decantato sarà smaltito ai sensi di legge (cfr. § 4.9).
- le seconde acque di sviluppo, prive di sedimento in sospensione, potranno essere conferite in fognatura di stabilimento oppure direttamente nella rete acque di pozzo a servizio del Polo Chimico multi societario.

Considerando il tempo necessario per ottenere acqua con contenuto in solidi sospesi sufficientemente basso per il recapito diretto alla rete di stabilimento pari a 3 ore, si ritiene indicativamente che il volume d'acqua da stoccare temporaneamente in vasca di decantazione per la sedimentazione dei solidi sospesi sia di circa 160 m³ per pozzo (considerando una portata media di 15

l/s durante le operazioni di spurgo e sviluppo), mentre il volume complessivo d'acqua per lo spurgo e lo sviluppo dei pozzi sarà di circa 2.500 m³ per pozzo.

4.8.2 *Fase di Esercizio della Barriera*

Durante la fase di esercizio della barriera idraulica è previsto il riutilizzo in sito delle acque emunte dalla barriera stessa, mediante il conferimento di queste nella rete acque di pozzo di sito. In tal modo, le acque emunte dalla barriera idraulica in progetto verranno impiegate entro il Polo Chimico multi societario e successivamente trattate presso l'impianto di trattamento acque reflue di sito, per essere infine conferite in fognatura comunale verso l'impianto di depurazione consortile.

L'approvvigionamento idrico operato dalla barriera idraulica andrà pertanto a sostituire progressivamente le acque emunte dai pozzi di stabilimento, con particolare riguardo ai pozzi emungenti l'acquifero profondo, per i quali è già prescritta la cementazione delle tratte filtranti poste a profondità superiori a 100 m da p.c.

Chemisol si riserva in ogni caso facoltà di valutare, in funzione delle necessità o opportunità che dovessero manifestarsi in futuro, di conferire le acque di emungimento della barriera idraulica in recapiti differenti dalla rete acque di stabilimento. Tale eventuale variazione del recapito, anche potenzialmente limitata ad un'aliquota delle acque emunte, verrà nel caso identificata solo a valle di verifiche e secondo modalità che verranno comunicate con congruo anticipo alle Autorità di Controllo.

4.9 *GESTIONE DEL TERRENO DI RISULTA DELLA PERFORAZIONE*

Sulla base delle attività di indagine condotte nell'ambito della caratterizzazione delle aree ex-AMI e del Campo Prove di cui al § 3.2 e sulla base degli esiti degli accertamenti analitici condotti in corso di prova sul terreno di risulta del pozzo pilota PW1, con particolare riguardo al terreno profondo, si evidenzia come i terreni di risulta delle attività di perforazione risultino potenzialmente conformi alle CSC previste dal D.Lgs. 152/06.

Su tale base, si prevede che per ogni pozzo di prevista installazione vengano prelevati i seguenti campioni medi di terreno naturale:

- 1 campione medio relativo all'intervallo di profondità p.c. – 3 m da p.c. (Terreno insaturo superficiale);
- 1 campione medio relativo all'intervallo di profondità 3 m – 10m da p.c. (Terreno insaturo intermedio);
- 1 campione medio relativo all'intervallo di profondità 10 m – 36m da p.c. (Terreno insaturo profondo);
- 1 campione medio relativo all'intervallo di profondità 36 m – 100m da p.c. (Terreno saturo);

Le profondità di campionamento potranno essere modificate con riferimento al riscontro di evidenze di alterazione del terreno di risulta della perforazione.

I campioni prelevati saranno sottoposti alla determinazione dei seguenti parametri analitici per la classificazione del materiale di risulta.

Tabella 4.6 *Campioni Terreno – Determinazioni Analitiche*

Metodica Analitica	Parametro	Metodica Analitica	Parametro
EPA 6020A 1998	Arsenico	EPA 8270D 2006	2-clorofenolo
EPA 6020A 1998	Cadmio	EPA 8270D 2006	2-metilfenolo
EPA 6020A 1998	Cromo totale	EPA 8270D 2006	3-metilfenolo
EPA 6020A 1998	Mercurio	EPA 8270D 2006	4-metilfenolo
EPA 6020A 1998	Nichel	EPA 8270D 2006	fenolo
EPA 6020A 1998	Piombo	EPA 8270D 2006	pentaclorofenolo
EPA 6020A 1998	Rame	EPA 8270D 2006	- IPA totali
EPA 6020A 1998	Zinco	EPA 8270D 2006	benzo[a]antracene
EPA 7199 Rev 0 1996	Cromo (VI)	EPA 8270D 2006	benzo[a]pirene
SXLC001/05	Pentaeritrite	EPA 8270D 2006	benzo[b]fluorantene
SXLC003/04	Melamina	EPA 8270D 2006	benzo[g,h,i]perilene
SXLC006/05	Esametilentetramina	EPA 8270D 2006	benzo[k]fluorantene
EPA 8315A 1996	Acetaldeide	EPA 8270D 2006	crisene
EPA 8315A 1996	Acetone + acroleina	EPA 8270D 2006	dibenzo[a,e]pirene
EPA 8315A 1996	Formaldeide	EPA 8270D 2006	dibenzo[a,h]antracene
EPA 8015D 2003	Idrocarburi pesanti >C12 (C12-C40)	EPA 8270D 2006	dibenzo[a,h]pirene
EPA 8015D 2003 mod (GRO)	Idrocarburi leggeri < C12	EPA 8270D 2006	dibenzo[a,i]pirene
EPA 8260C 2006	Acetone	EPA 8270D 2006	dibenzo[a,l]pirene
EPA 8270D 2006	Anilina	EPA 8270D 2006	indeno[1,2,3-cd]pirene
EPA 8270D 2006	2,4,6-Triclorofenolo	EPA 8270D 2006	pirene
EPA 8270D 2006	2,4-Diclorofenolo		

Se, sulla base dei risultati analitici ottenuti, il terreno derivante dalla perforazione dei pozzi barriera non risulterà conforme alle CSC di legge, verrà smaltito ai sensi della vigente normativa.

Il materiale conforme alle CSC di legge potrà essere stoccato all'interno del sito a cura di *Chemisol*, in attesa di riutilizzo entro il sedime del Polo chimico multi societario.

Complessivamente, per le attività di perforazione dei sei pozzi in progetto, si prevede l'estrazione di circa 120 m³ di terreno di risulta, equivalenti a circa 200 ton di materiale.

La medesima serie di parametri analitici riportata in *Tabella 4.6* sarà inoltre impiegata per la caratterizzazione dei sedimenti di decantazione delle acque di sviluppo, di cui al § 4.8. A valle della caratterizzazione gli stessi saranno smaltiti con codice CER 19 13 05*, 19 13 06 o 19 13 07*, in funzione delle risultanze di analisi.

4.10

RILIEVO PLANOALTIMETRICO

Al termine delle attività, per una corretta localizzazione dei pozzi di monitoraggio e per un loro impiego nell'ambito di monitoraggi piezometrici, si provvederà all'esecuzione di un rilievo plano-altimetrico delle teste-pozzo.

Il rilievo piano altimetrico sarà condotto, con GPS ad alta precisione con stazione fissa e stazione mobile, secondo una poligonale chiusa ed un errore finale massimo inferiore a 0,5 cm.

In ogni piezometro/pozzo sarà apposto un riferimento per le successive misure freatiche e fornita la quota rispetto alla testa pozzo.

Il rilievo sarà eseguito su tutti i pozzi di nuova costruzione, correlandoli a quelli esistenti.

4.11 *AVVIAMENTO DEL SISTEMA DI CONTENIMENTO IDRAULICO*

Completate le opere di installazione è prevista l'esecuzione di test idraulici, con prove a gradini e eventualmente di lunga durata, per la verifica esecutiva dei parametri idraulici ed idrogeologici utilizzati per la creazione del modello idraulico.

Sulla base dei dati acquisiti verrà aggiornato il modello di flusso, di cui al § 4.2, e definite le portate di esercizio dei pozzi barriera.

4.12 *RAPPORTO DI AVVIAMENTO*

Dopo l'avviamento dei sistemi sarà predisposto un rapporto di avviamento che conterrà una descrizione dei lavori svolti ed il progetto della barriera come "as built".

In particolare saranno descritti:

- ubicazione e portata di esercizio del pozzo di emungimento;
- descrizione e dimensionamento finale dell'impianto;
- regolazione dell'impianto ed assetto finale.

4.13 *COMPUTO METRICO ESTIMATIVO - BARRIERA IDRAULICA*

In Tabella 4.7 si riporta il computo metrico estimativo per la realizzazione dei 6 pozzi barriera (addizionali al pozzo pilota PW1 già installato) e per la fornitura e posa dei 7 impianti di sollevamento relativi ai 6 pozzi nuovi e al pozzo pilota.

Tale quadro economico include tutti i costi associati all'installazione delle opere con la sola esclusione degli oneri tecnici di supervisione del cantiere, di Direzione Lavori ed di Coordinamento per la Sicurezza.

Tabella 4.7 Installazione Barriera Idraulica - Computo Metrico Estimativo

Art.	Descrizione	U.M.	Quantità	Prezzo Unitario	Importo
1	Allestimento e smobilitazione cantiere di perforazione, compreso trasporto in andata e ritorno dell'impianto di perforazione e di tutte le attrezzature occorrenti e spostamento attrezzature sui 6 punti di perforazione, ubicati entro una distanza di 250 m	forfait	1	€ 15.500	€ 15.500
2	Perforazione a rotazione con circolazione inversa di fluidi d=450 mm da 0 a 100 m dal p.c. con fluido di perforazione costituito da acqua o fango bentonitico diluito (<1%)	m	600	€ 173	€ 103.800
3	Fornitura e posa tubazioni cieche in acciaio al carbonio verniciato o zincato d= 219 mm, s= 5 mm, compresi anelli distanziatori, alle profondità di 0m-30m, 60m-72m, 78m-84m e 96m-100 m da p.c.	m	312	€ 65	€ 20.280
4	Fornitura e posa di tubazioni con filtro a ponte d= 219 mm, s= 5 mm, luce 4 x 40 x 1,5 mm alla profondità di 30-60 m dal p.c.	m	180	€ 79	€ 14.220
5	Fornitura e posa di tubazioni in acciaio al carbonio verniciato o zincato con filtro a ponte d= 219 mm, s= 5 mm, luce 4 x 40 x 0,7 mm alle profondità di 72-78 e 84-96 m dal p.c. con intercalazione di tratti ciechi	m	108	€ 79	€ 8.532
6	Fornitura e posa in opera per gravità di boiaccia di cemento con bentonite 2-3% per isolamento sommitale del pozzo alle profondità di 0-27 m dal p.c.	m3	24,3	€ 345	€ 8.384
7	Fornitura e posa in opera per gravità di argilla sferoidale per isolamento tratti ciechi alle profondità di 27-29, 61-71, 79-83 e 97-100 m da p.c.	m3	17,1	€ 800	€ 13.680
8	Fornitura e posa in opera per gravità di ghiaietto siliceo calibrato e selezionato d= 4/6 mm nell'intercapedine tra parete foro e tubazione alla profondità di 29-61 m dal p.c. e d= 3/4 mm alle profondità di 71-79 e 83-97 m dal p.c.	m3	48,6	€ 175	€ 8.505
9	Smaltimento fanghi di perforazione	ton	120	€ 135	€ 16.200
10	Sviluppo pozzi con compressore d'aria o pistonaggio e chiarificazione con elettropompa con vostro equipaggiamento per una durata minima di ore 48	cad.	6	€ 4500	€ 27.000
11	Prova di pompaggio a portata variabile con gradini di portata Q= 2-5-10-15 l/s e monitoraggio livello dinamico nel pozzo per una durata complessiva di 8 ore, eseguita mediante elettropompa sommersa provvisoria	cad.	6	€ 2400	€ 14.400
12	Fornitura e posa camera avampozzo carrabile n cls. prefabbricato o posato in opera L= 1 m x 2 m x 1,0 m, s= 0,2 m con chiusino carrabile in ghisa	cad.	6	€ 4000	€ 24.000
13	Fornitura e posa testa di pozzo flangiata per tubo d= 219 mm in acciaio al carbonio verniciato o zincato	cad.	6	€ 670	€ 4.020
14	Fornitura e posa testa di pozzo flangiata per tubo d= 323 mm in acciaio al carbonio verniciato o zincato	cad.	1	€ 825	€ 825
15	Fornitura e posa tubo guida per sonda freaticometrica in PVC o PEAD d= 1"½	m	315	€ 3	€ 945
16	Fornitura e posa impianto di sollevamento (come da § 4.6)	cad.	7	€ 8.830	€ 61.807
17	Fornitura e posa quadro elettrico con inverter	cad	7	€ 2.900	€ 20.300
Totale Installazione Barriera Idraulica					€ 362.398

4.14 CRONOPROGRAMMA DEGLI INTERVENTI

Una stima della durata complessiva degli interventi di realizzazione della barriera idraulica viene di seguito riportata:

Tabella 4.8 Barriera Idraulica - Cronoprogramma Installazione

Descrizione Interventi	Durata sigola fase
Preparazione delle postazioni di lavoro, a mezzo realizzazione prescavi	15 giorni lavorativi complessivi
Realizzazione pozzi (includendo la perforazione, il tubaggio, il completamento, lo sviluppo e la prova di collaudo con pompa temporanea)	90 giorni lavorativi complessivi (15 giorni lavorativi / pozzo)
Realizzazione camerette avampozzo	10 giorni lavorativi complessivi
Installazione e collaudo impianti di sollevamento (*)	10 giorni lavorativi complessivi

** NB Il collaudo dell'impianto di sollevamento definitivo sarà subordinato al completamento dell'interconnecting*

In allegato H si riporta il Cronoprogramma di dettaglio degli interventi previsti la cui durata complessiva è stimata in 20 settimane.

L'avvio dei pozzi barriera sarà subordinato al completamento delle opere di collegamento di questi alla rete acque pozzo di stabilimento.

4.15 MISURE DI SICUREZZA NEL CANTIERE DI PERFORAZIONE

Per la protezione dei lavoratori che eseguiranno le attività di perforazione e installazione pozzi saranno predisposti specifici piani di sicurezza, ai sensi del *D.Lgs. 81/2008*, per la valutazione e gestione dei rischi specifici ed indotti dalle lavorazioni effettuate.

Con riferimento a possibili interferenze con le attività ed il personale di stabilimento, le aree di cantiere saranno opportunamente delimitate e la viabilità limitrofa alle zone di lavoro appositamente modificata.

Relativamente agli impatti sull'area circostante, si evidenzia come la zona di intervento è localizzata all'interno del Polo Chimico multi societario e che le aree esterne più prossime sono costituite dal sedime ferroviario interessato da permanenza di persone temporalmente ridotta.

4.15.1 Mezzi d'Opera e di Trasporto

Tutti i mezzi che si intendono utilizzare, dei quali segue un elenco indicativo, saranno a norma e rispondenti all'uso:

- Sonda di perforazione;
- Mini-escavatore cingolato o gommato a braccio rovescio con benna di carico e martello demolitore;
- Cassoni scarrabili e vasche di circolazione fluidi di perforazione e separazione terreno di perforazione;
- motrici con bilici per la movimentazione interna al cantiere dei materiali;

- eventuale autospurgo o cisterne autotrasportate;

4.15.2 *Personale Operativo*

In cantiere saranno presenti continuativamente:

- 2 operatori alla sonda;
- capo cantiere eventualmente coadiuvato da un assistente.

Per le mansioni sopra individuate, il documento di valutazione dei rischi dell'impresa incaricata dovrà prevedere specifiche misure di sicurezza inclusa l'impiego di appositi DPI.

Saranno inoltre presenti con cadenza periodica:

- 1 autista per il trasferimento interno del terreno di risulta della perforazione, caricato in cassoni scarrabili dagli operatori della sonda;
- Direttore dei Lavori,
- Responsabile della Sicurezza del Cantiere.

4.15.3 *Documenti di Cantiere*

Il capocantiere avrà cura di tenere in cantiere un registro di cantiere ove annoterà:

- le presenze del personale di cantiere;
- lavorazioni eseguite e loro durate orarie;
- eventuali infortuni e cause;
- mezzi e materiali di consumo utilizzati.

Il responsabile della gestione interna dei materiali manterrà:

- identificazione planimetrica delle aree di stoccaggio del terreno proveniente dai diversi lotti di perforazione;
- "catena di custodia" dei campioni rappresentativi dei diversi lotti di terreno di risulta della perforazione, inviati al laboratorio per analisi.

Nel presente capitolo si descrive il progetto di trattamento di "Air Sparging" (di seguito AS) inclusivo di protocollo per l'esecuzione di un campo prove per l'applicazione del metodo per la mitigazione del pennacchio di Manganese presente in acqua di falda nel settore meridionale del Polo Chimico multisocietario.

Tale modalità di gestione dei superamenti della CSC per Manganese è stata individuata in base a quanto emerso in sede di analisi dei dati idrochimici di cui al § 2.5, con particolare riferimento all'evidenza che in presenza di concentrazioni superiori a 2 mg/l di Ossigeno disciolto non si presentano, nell'ambito del sito, superamenti delle CSC per tale parametro, e che pertanto il ripristino di tale tenore di ossigeno nelle acque di falda dell'area di interesse sia condizione sufficiente per la precipitazione di tale composto e la riduzione delle concentrazioni presenti nella matrice acque.

Tale differenziazione nelle modalità di gestione dei superamenti di Manganese rispetto a quelli per Arsenico tiene inoltre conto che, come evidenziato al § 2, la distribuzione e la probabile origine di tali composti non sia direttamente correlabile e sovrapponibile.

5.1

GENERALITÀ

L'Air Sparging (AS) è una tecnologia di bonifica che consiste nell'insufflaggio di aria o aria arricchita in ossigeno nella porzione satura dell'acquifero, in genere utilizzata per la rimozione di sostanze organiche volatili (VOC) dall'acqua di falda. Poiché tale tecnologia determina come effetto secondario la precipitazione degli ioni di alcuni metalli pesanti, si intende sfruttare tale effetto per il trattamento del pennacchio di Manganese riscontrato presso il sito in esame ⁽¹⁾.

Allo stato attuale delle conoscenze inerenti l'idrochimica della falda presso il sito di studio, non è chiaro quale causa determini la presenza di Manganese nelle acque, anche se le due possibilità che appaiono più probabili sono le seguenti:

- presenza di Manganese in soluzione a seguito di riduzione chimica delle forme ossidate insolubili di Manganese contenute nell'acquifero, a seguito della diminuzione della concentrazione di Ossigeno in falda; tale impoverimento in ossigeno potrebbe verosimilmente determinarsi per effetto di processi degradativi a carico di sostanze organiche, attualmente non individuate con certezza.

(1) Un riferimento di letteratura è il seguente: Suthersan S.S.,1997. *Remediation Engineering. Design Concepts*. Lewis Publishers.

- Eventuale presenza di una contaminazione dovuta al rilascio di un composto di Manganese, non individuato.

Quando l'AS viene utilizzato per la rimozione di un contaminante organico volatile (VOC), in genere viene associato alla tecnica del "Soil Vapour Extraction" (SVE), che consiste nell'estrazione di vapori dal terreno insaturo. Presso il sito in esame, la contaminazione da Manganese non risulta associabile alla presenza di contaminanti organici volatili, per cui l'applicazione dello SVE non è stata ritenuta necessaria, anche in considerazione del notevole spessore dell'orizzonte insaturo posto tra la tavola d'acqua ed il livello piezometrico.

5.2

DESCRIZIONE DEL PROCESSO

La tecnica dell'AS consiste nell'iniezione di aria atmosferica o aria arricchita in ossigeno, che viene insufflata in pressione (per mezzo di compressori oil-free) nell'acquifero saturo, quindi al di sotto della superficie piezometrica. Tale processo produce un arricchimento di Ossigeno disciolto (OD) nell'acquifero e determina il passaggio in fase vapore dei composti volatili (VOC) e la precipitazione dei metalli pesanti eventualmente presenti.

Il meccanismo con cui l'aria insufflata attraversa l'acquifero saturo è in generale riconducibile a due meccanismi principali:

- formazione di canali discreti con direzione sub-verticale attraverso cui l'aria fluisce;
- formazione di bolle d'aria che risalgono verso la tavola d'acqua attraversando lo spessore saturo dell'acquifero.

Gli studi più recenti condotti a scala di laboratorio sembrano indicare la formazione di canali di flusso stabili, nel caso di mezzi porosi costituiti da sabbie, mentre nel caso di ghiaie grossolane sembrano indicare un predominante meccanismo di flusso attraverso la formazione di bolle d'aria.

Il settore d'acquifero interessato dall'insufflaggio d'aria tramite i pozzi di AS è teoricamente rappresentabile come un cono rovesciato con vertice ubicato presso i filtri del punto di iniezione. Tale situazione è riferita al caso ideale di un terreno perfettamente omogeneo e isotropo, con litologie grossolane e flussi d'aria molto ridotti. Esperimenti riportati in letteratura hanno però mostrato che il settore d'acquifero interessato dallo *sparging* è spesso asimmetrico, a causa della disomogeneità nella permeabilità dell'acquifero e dell'instaurarsi di percorsi preferenziali con andamento casuale e di difficile previsione.

Alcuni studi mostrano come, per basse pressioni di insufflaggio, l'aria percorre orizzontalmente da 1 a 2 volte la distanza percorsa lungo la direzione verticale e che all'aumento della pressione di insufflaggio la distanza percorsa orizzontalmente tende ad aumentare. Alcune osservazioni di campo indicano invece che la distanza percorsa orizzontalmente dall'aria varia da circa 3 m a

circa 12 m dal punto di insufflaggio, indipendentemente dalla portata d'aria insufflata e dalla profondità del punto di insufflaggio.

La presenza di disomogeneità nei valori di conducibilità idraulica, al di sopra del punto di insufflaggio, può determinare un allargamento dell'area interessata dall'insufflaggio stesso.

La miscelazione dell'ossigeno con l'acqua di falda a seguito delle operazioni di sparging deriva dal processo di diffusione molecolare dell'ossigeno, attraverso l'interfaccia aria-acqua, nell'aria contenuta nei canali di flusso all'interno dell'acquifero saturo. Un funzionamento discontinuo dell'insufflaggio aumenta l'efficienza dei processi di ossigenazione e di rimozione dei contaminanti, a seguito dell'instaurarsi di processi non stazionari di innalzamento e riduzione del livello piezometrico.

5.3 *APPLICABILITÀ DEL METODO*

5.3.1 *Tipo di contaminanti*

La tecnica dell'AS viene generalmente applicata in presenza di contaminanti che presentano una buona strippabilità, un'elevata volatilità e che presentano una buona biodegradabilità in condizioni aerobiche. I composti chimici che vengono più facilmente trattati in quanto aventi le caratteristiche sopra descritte sono i solventi organici aromatici (BTEX), i solventi clorurati (PCE, TCE, DCE), i costituenti delle benzine, ecc. L'efficacia del processo di AS applicato alle contaminazioni da composti organici è quindi tanto maggiore quanto maggiore è la tendenza del composto a migrare dalla fase disciolta e/o residuale alla fase vapore.

Un effetto secondario dell'insufflaggio di aria nell'acquifero saturo è l'ossidazione degli ioni metallici, in particolare Ferro e Manganese, dovuta all'aumento del potenziale redox, associato all'aumento delle concentrazioni di ossigeno in acqua di falda. Le forme più ossidate di questi metalli sono caratterizzate, infatti, da una minore solubilità, il che ne determina la precipitazione e la conseguente rimozione dalle acque di falda.

Entrambi i processi (trasferimento di massa dei VOC e ossidazione dei metalli) dipendono dalla capacità del sistema di determinare un aumento della concentrazione di Ossigeno disciolto in acqua di falda e, in definitiva, un effettivo contatto tra l'aria insufflata e il contaminante in soluzione.

5.3.2 *Considerazioni di tipo geologico*

Il successo delle applicazioni dell'AS dipende, innanzitutto, dalla conducibilità verticale e orizzontale dell'acquifero ai gas, la cui misura sperimentale non è semplice, e dalla presenza di discontinuità litologiche al di sopra del punto di insufflaggio.

La permeabilità verticale è direttamente proporzionale alla porosità efficace e inversamente proporzionale alla dimensione media dei grani che costituiscono l'acquifero. In assenza di informazioni sito specifiche derivanti da test pilota, bisognerebbe limitare la tecnica dell'AS ad acquiferi con conducibilità idraulica maggiore di 10^{-3} cm/s. Il sistema di AS presenta quindi la massima efficacia in terreni costituiti da sabbie e ghiaie.

La presenza di lenti di materiale fine può impedire la risalita dell'aria fino alla tavola d'acqua, riducendo l'efficienza dell'insufflaggio. Strati ad alta permeabilità possono determinare, per contro, l'instaurazione di vie preferenziali di diffusione dell'aria e limitando l'ossigenazione negli altri settori da trattare.

Anche in suoli molto permeabili (permeabilità $> 10^{-1}$ m/s) è presente un potenziale svantaggio dovuto al fatto che l'aria iniettata nell'acquifero si propaga prevalentemente in direzione verticale limitando così le dimensioni della zona di influenza di ciascun punto di iniezione (*Nyer and Suthersan, 1993*).

5.4

PROCESSI A CARICO DEI CONTAMINANTI

L'applicazione dell'AS in falda determina diversi effetti, che includono:

- la volatilizzazione dei composti organici volatili;
- lo stripping dei composti organici volatili;
- l'aumento della degradazione biologica dei composti organici;
- la precipitazione dei metalli pesanti in falda.

In particolare, la precipitazione dei metalli pesanti in falda è l'effetto del trattamento di AS che meglio si applica al Manganese.

Un fenomeno che si verifica generalmente con l'applicazione del sistema di *Air Sparging*, riguarda l'ossidazione e precipitazione di alcuni metalli presenti in soluzione, a causa dell'incremento della concentrazione di Ossigeno disciolto nelle acque di falda e del conseguente aumento del Potenziale Redox. Si intende sfruttare questo fenomeno per il trattamento del pennacchio di Manganese osservabile nel settore meridionale dell'insediamento.

Come effetto secondario della precipitazione dei metalli si potrebbe determinare una locale riduzione della conducibilità idraulica dell'acquifero.

L'eventuale effetto di riduzione della conducibilità potrà essere monitorato mediante l'esecuzione periodica di prove di pompaggio pozzo-piezometro nel settore interessato dal trattamento di ossigenazione.

5.5 EFFETTI FISICI SULL'ACQUIFERO

5.5.1 Innalzamento del Livello Piezometrico ("*mounding*")

L'iniezione di aria all'interno dell'acquifero provoca necessariamente, in corrispondenza della zona di influenza dell'insufflaggio, lo spostamento dell'acqua contenuta nello spazio interstiziale dell'acquifero saturo. Lo spostamento dell'acqua ha una componente verticale e una orizzontale.

La componente verticale determina transitoriamente un innalzamento della superficie piezometrica ("*mounding*"), con innalzamenti compresi tra pochi cm e qualche decina di centimetri, in funzione sia della litologia del terreno saturo interessato dall'AS che del flusso d'aria insufflato. Tale zona di innalzamento piezometrico tende a collassare, in genere dopo alcune ore dall'avvio del sistema, quando si sono stabiliti i percorsi preferenziali di flusso dell'aria insufflata e la relativa portata d'aria verso il terreno insaturo, così che l'aria dispersa attraverso la tavola d'acqua eguaglia la portata d'aria insufflata. In sintesi, le fasi in cui possono essere suddivisi i processi che si instaurano dall'avvio dell'insufflaggio sono le seguenti:

- fase di espansione, in cui l'area interessata dall'insufflaggio si espande verticalmente e lateralmente a seguito dell'espansione dell'aria, con conseguente spostamento dell'acqua dallo spazio interstiziale e fenomeno di *mounding*;
- fase di collasso, in cui si instaura un equilibrio tra il flusso d'aria entrante nell'acquifero e quello uscente attraverso la tavola d'acqua e in cui si stabilizzano i canali di flusso preferenziale;
- fase stazionaria.

L'estensione dell'area interessata da *mounding* è stata utilizzata, soprattutto in passato, come indicatore dell'estensione dell'area influenzata dal flusso di aria nell'acquifero saturo dovuto all'insufflaggio tramite il pozzo di *Sparging*. Recentemente si è capito invece che la presenza di *mounding* non è necessariamente associata alla presenza di aria nella zona satura dovuta all'AS e che l'estensione della zona interessata da *mounding* non può quindi essere considerata un indicatore del volume di influenza dell'AS. Infatti, spesso il *mounding* si estende oltre la zona di influenza dello sparging, specialmente se l'acquifero trattato è parzialmente confinato.

La velocità con cui l'acqua viene spostata dai pori dal flusso d'aria insufflato dipende dalla permeabilità dell'acquifero, per cui i processi transitori di innalzamento del livello piezometrico e successivo collassamento dell'area di innalzamento hanno durata maggiore in presenza di litologie fini.

5.6 CRITERI GENERALI DI PROGETTAZIONE

5.6.1 *Disposizione dei Punti di Insufflaggio*

I punti di insufflaggio possono essere disposti ai vertici di celle a maglia regolare fino a coprire l'area sorgente di contaminazione, se conosciuta, o allineati a formare una cortina continua a valle della sorgente per intercettare un *plume* di contaminazione.

I punti di insufflaggio devono avere una distanza sufficientemente piccola da consentire la sovrapposizione parziale tra le rispettive zone di influenza, in modo da creare un'area continua di arricchimento di ossigeno della falda.

5.6.2 *Profondità dei Punti di Insufflaggio*

La scelta della profondità dei punti di insufflaggio dipende in prima battuta dalla profondità raggiunta dalla contaminazione da trattare.

La profondità massima è influenzata dalla presenza di discontinuità delle proprietà idrogeologiche lungo la verticale e l'iniezione d'aria al di sotto di lenti poco permeabili dovrebbe essere evitata.

Le esperienze pratiche di applicazione del metodo sono in genere relative a punti di insufflaggio con spessori di colonna d'acqua da trattare comprese tra 9 e 18 m. La profondità di insufflaggio determina l'ampiezza dell'area di influenza, perché ad un aumento di profondità di insufflaggio corrisponde un allargamento dell'area influenzata dell'aerazione in corrispondenza della tavola d'acqua, ma a tale aumento deve corrispondere anche ad un incremento della portata d'aria da insufflare e della pressione del compressore.

5.6.3 *Pressione di Insufflaggio*

La pressione di insufflaggio è quella sufficiente a vincere la resistenza offerta dell'acqua, rappresentata dalla somma della pressione idrostatica e della pressione necessaria a vincere la resistenza dell'acqua allo spostamento dai pori nei filtri e nel dreno del pozzo di insufflaggio e nell'acquifero:

$$P_i = H_i + P_d + P_c$$

dove:

P_i = pressione di insufflaggio

H_i = pressione determinata dalla colonna d'acqua di falda al di sopra del punto di insufflaggio

P_d = pressione di ingresso nei filtri e nel dreno

P_c = pressione di ingresso nell'acquifero

La pressione idrostatica è pari ad 1 bar ogni 10 metri di colonna d'acqua. Per far sì che l'aria entri all'interno dell'acquifero, è inoltre necessario vincere la

cosiddetta pressione di ingresso, necessaria per vincere la resistenza capillare allo spostamento dell'acqua dai pori del terreno. La pressione d'ingresso da utilizzare negli impianti di AS presenta valori variabili da un minimo di 0,003÷0,005 bar per acquiferi ghiaiosi ad un massimo di 0,6÷0,8 bar per acquiferi limoso-argillosi (Johnson et al., 1993).

Pressioni in ingresso troppo elevate sono sconsigliate, perché possono provocare l'instaurarsi di condizioni di turbolenza all'interno dell'acquifero e possono generare la migrazione del plume di contaminante a seguito dell'elevata spinta orizzontale, con direzione radiale rispetto al punto di insufflaggio.

Un altro possibile effetto dell'applicazione di eccessive pressioni è la fratturazione pneumatica del terreno con formazione di canali di flusso preferenziali e riduzione dell'efficienza di ossigenazione.

5.6.4 Portata di Insufflaggio

La portata d'aria in ingresso dovrebbe essere impostata sul valore minimo che garantisce un'aerazione dell'acqua di falda nell'intorno del punto di insufflaggio sufficiente a ottenere concentrazioni di Ossigeno disciolto in falda maggiori di 2 mg/l, a regime. Valori tipici di portata insufflata sono compresi tra 1,5 e 25 m³/h.

Come nel caso dell'applicazione di pressioni eccessive, anche l'utilizzo di portate d'aria in ingresso troppo elevate è da sconsigliare al fine di evitare una migrazione laterale del plume di contaminante disciolto. Per ridurre al minimo la probabilità di fratturazione pneumatica dell'acquifero è necessario aumentare gradualmente la pressione di iniezione durante le fasi di avvio dell'impianto di insufflaggio.

5.6.5 Caratteristiche dei Pozzi di Insufflaggio (Injection Point – IP)

Generalmente l'insufflaggio avviene attraverso l'installazione di pozzi di *Sparging* con colonna in PVC di diametro variabile da 1" a 4", con il tratto finestrato installato alcuni metri al di sotto della superficie piezometrica e con lunghezza variabile da 0,5 m a 1,5 m in base alla profondità dell'acquifero. Intorno al tratto filtrato verrà posato un dreno costituito da ghiaietto siliceo, con diametro selezionato in base al materiale costituente l'acquifero.

Il diametro del pozzo di iniezione non sembra essere correlato all'efficienza del sistema di AS. Ciononostante, la riduzione del diametro del tubo di completamento del pozzo determina un incremento delle perdite di carico, specialmente per punti con profondità elevata.

Per impedire la risalita dell'aria insufflata nell'intercapedine tra il perforo del pozzo e il tubo di rivestimento è necessario isolare il tratto al di sopra dei filtri

mediante la posa di argilla sferoidale, fino indicativamente a 1 m dal p.c. e mediante l'installazione di un tappo sommitale realizzato con boiaccia di cemento con un contenuto di bentonite del 2-3%.

5.7 *CARATTERISTICHE SITO-SPECIFICHE DELL'ACQUIFERO E DELLA CONTAMINAZIONE*

5.7.1 *Caratteristiche dell'Acquifero*

Sulla base delle stratigrafie dei pozzi e dei piezometri di stabilimento e delle sezioni idrogeologiche realizzate, la porzione d'acquifero saturo da trattare mediante AS è costituita prevalentemente da ghiaie debolmente sabbiose dal livello statico della falda, ubicato alla profondità di circa 35 m dal p.c., fino alla profondità di circa 60 m dal p.c., al di sotto della quale si incontrano alternanze di sabbie e ghiaie in matrice limosa e limi/limi argillosi fino a circa 85 m dal p.c. Questo strato più fine costituisce un acquitardo, che separa le ghiaie soprastanti dalle ghiaie che si incontrano fino ad almeno 100 m dal p.c.

Non risultano presenti lenti di materiale fine tra il livello statico e la profondità di 60 m dal p.c.

In base alle prove di pompaggio eseguite durante il campo prove realizzato tra il 12 e il 16 ottobre 2008, la conducibilità idraulica dell'acquifero fino a 100 m dal p.c. è compresa tra $k=1,75 \times 10^{-4}$ m/s e $k=2,4 \times 10^{-4}$ m/s.

5.7.2 *Distribuzione e Tipologia della Contaminazione*

Il plume di Manganese che si intende trattare mediante la tecnologia dell'AS si sviluppa, sulla base degli esiti della campagna di monitoraggio idrochimico della falda del Marzo 2008, tra la zona posta in corrispondenza dei piezometri MW5 e MW16, nel settore meridionale del sito. Le concentrazioni misurate presso questi punti di misura sono comprese tra 1000 e 1300 µg/l.

5.7.3 *Applicabilità del Metodo nelle Condizioni Sito-Specifiche*

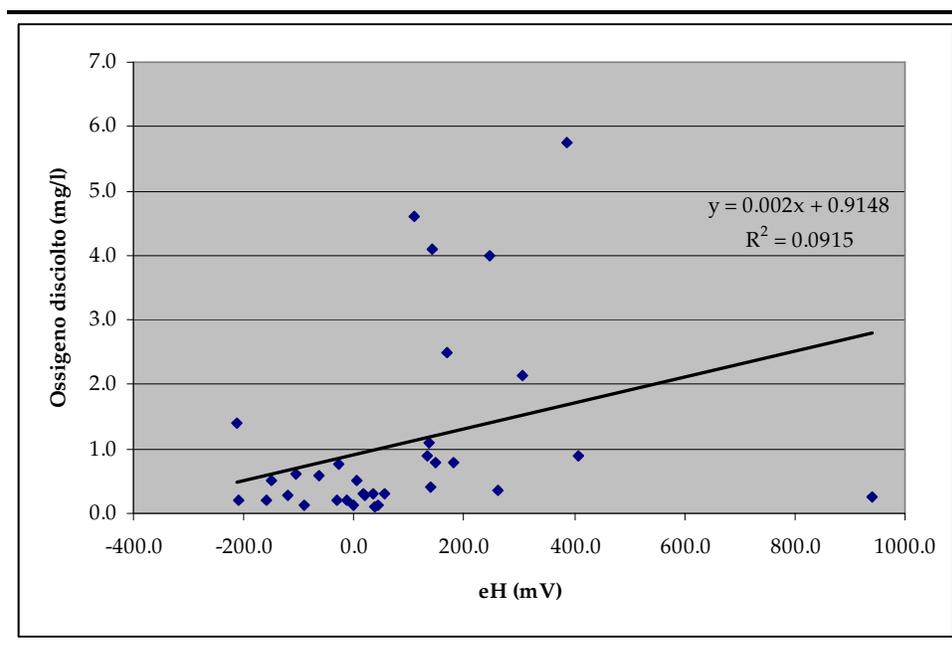
Il sito risulta idoneo dal punto di vista litologico all'installazione di un sistema di AS fino alla profondità di 55-60 m dal p.c., al di sopra cioè dello strato di sabbie o ghiaie in matrice limosa o di limi e/o argille che si incontra fino alla profondità di circa 85 m dal p.c.

Dall'osservazione del diagramma eH/pH relativo al Manganese, risulta che la precipitazione del metallo avviene per valori di potenziale *redox* maggiore di 700 mV a condizioni di pH pari a circa 7-7,5, riscontrabili presso il sito. Nelle condizioni indicate si ottiene la precipitazione del Manganese sotto forma di MnO₂.

Dai dati sperimentali a disposizione, si osserva un certo grado di correlazione tra le concentrazioni di Ossigeno disciolto e il potenziale *redox*, ma risulta che a concentrazioni di Ossigeno disciolto comprese tra 2 e 6 mg/l, il potenziale

redox è stato superiore a 400 mV soltanto in un caso, che appare isolato rispetto agli altri (cfr. *Figura 5.1*).

Figura 5.1 *Ossigeno Disciolto / Potenziale Redox*



Ciononostante, osservando il grafico riportante le concentrazioni di Manganese e di Ossigeno disciolti in falda rilevate in sito, si nota che per concentrazioni di Ossigeno disciolto superiori a 2 mg/l le concentrazioni di Manganese sono sempre inferiori alla CSC di legge per le acque di falda (pari a 50 µg/l), rappresentata con la linea orizzontale magenta in *Figura 2.22*.

Questa osservazione sperimentale giustifica la sperimentazione dell'AS per il trattamento del plume di Manganese presente in sito.

5.8 COSTITUENTI DEL SISTEMA DI AIR SPARGING

5.8.1 Pozzi di Insufflaggio (IP)

I pozzi di insufflaggio avranno le seguenti caratteristiche (cfr. *Figure 16 e 17*):

- diametro di perforazione $d = 152$ mm
- profondità di perforazione $h = 50,5$ m
- metodo di perforazione: carotaggio continuo (pozzo pilota) o rotazione con circolazione di fluidi (altri pozzi iniezione)
- tubazione installata: in PVC $d = 3''$, $s = 5,5$ mm, con tratto cieco da 0 a 48,5 m dal p.c., tratto microfessurato (slot 1,5 mm) tra 48,5 e 50 m dal p.c., senza fondello
- cementazione per isolamento sommitale: eseguita con boiaccia di cemento con contenuto di bentonite del 2-3 % tra 0 e 46,5 m dal p.c.

- isolamento sommitale filtro: eseguito mediante posa a gravità di argilla sferoidale bentonitica tra 46,5 e 48,5 m dal p.c.
- dreno: costituito da ghiaietto siliceo calibrato e selezionato $d= 3-5$ mm o 4-6 mm, posato a gravità tra le profondità di 48,5 e 50,5 m dal p.c.
- Testa filettata a tenuta con filettatura gas, equipaggiata con manometro e raccordo a tenuta con filettatura gas, a sua volta dotato di tronchetto e flussimetro per il collegamento con il tubo di mandata del compressore.

Le profondità indicate potranno subire modifiche in corso d'opera in funzione delle caratteristiche stratigrafiche rilevate durante la perforazione.

Dopo la realizzazione il pozzo verrà spurgato e sviluppato mediante pompaggio con elettropompa sommersa diametro da 2" a 3", installata provvisoriamente alla profondità di 40 m dal p.c., fino a chiarificazione delle acque sollevate.

5.8.2 *Piezometri di Monitoraggio (MP)*

Verranno realizzati 3 piezometri di monitoraggio ubicati alle distanze $d= 2,5$ m, 5m, 10 m dal primo pozzo di insufflaggio e disposti a raggiera intorno al pozzo onde consentire di monitorare eventuali anisotropie del terreno (cfr. *Figure 16 e 17*). Le caratteristiche costruttive dei piezometri saranno le seguenti:

- diametro minimo di perforazione $d= 101$ mm
- profondità di perforazione $h= 50,5$ m
- metodo di perforazione: rotazione con circolazione di fluidi
- tubazione di rivestimento: PVC $d= 2''$, $s= 5$ mm, con tratto cieco da 0 a 40 m dal p.c. e tratto microfessurata tra 40m e 50 m dal p.c.
- cementazione per isolamento sommitale: eseguita con boiaccia di cemento con contenuto di bentonite del 2-3 %, profondità comprese tra p.c. e 38 m dal p.c.
- isolamento sommitale filtro: eseguito mediante posa a gravità di argilla sferoidale bentonitica tra 38 e 40 m dal p.c.
- dreno: costituito da ghiaietto siliceo calibrato e selezionato $d= 4-6$ mm, posato a gravità tra le profondità di 40 e 50,5 m dal p.c.
- testa filettata a tenuta con filettatura gas equipaggiata con manometro ad elevata sensibilità.

5.8.3 *Compressore e Apparecchiature Ausiliarie*

Le caratteristiche del compressore saranno le seguenti:

- tipologia: *oil-free*
- pressione massima esercizio: 2,0 bar
- portata massima di esercizio: 30 m³/h

Le apparecchiature ausiliarie saranno:

- filtro a carboni attivi sul bocchettone di mandata capacità V= 500 l, valvole di regolazione e rubinetto di prelievo (non necessario se compressore *oil-free*);
- regolatore di pressione (P ingresso: 15 Bar);
- regolatore di portata (per portate massime 40 m³/h);
- rubinetto per campionamento d=3/8";
- tubazione di mandata aria compressa resistente a P=20 bar;
- adattatore con filettatura gas in metallo o PVC pesante per connessione alla testa del pozzo di insufflaggio d= 3".

5.9

CAMPO PROVA

Per l'implementazione di un trattamento del plume di Manganese riscontrato presso il Polo Chimico di Castellanza-Olgiate Olona mediante AS, verrà realizzato un campo prova, che avrà anche lo scopo di verificare le caratteristiche impiantistiche di un impianto *full scale*, con particolare riguardo a portate e pressioni di insufflaggio, all'estensione della zona di influenza dei punti di iniezione, alla variazione indotta nella concentrazione di Ossigeno disciolto e di Manganese in falda.

In prove di lunga durata è possibile valutare la variazione dei parametri di processo in relazione alle variazioni ambientali al contorno (umidità dei terreni nella porzione insatura dell'acquifero, oscillazione della superficie piezometrica, etc).

Nel caso dello stabilimento di Castellanza, la durata prevista della prova pilota è di circa **due settimane**, ritenute congrue per osservare il raggiungimento della stazionarietà della concentrazione di Ossigeno disciolto in falda preso il punto di iniezione.

In relazione alla geometria e localizzazione del plume di Manganese (che interessa la direttrice tra i piezometri MW5 e MW16), si identifica come area di prevista installazione del campo prove il settore limitrofo al piezometro MW5, posto al confine Sud-Orientale della zona B di stabilimento (cfr. *Allegato A*). Tale localizzazione (anche nella configurazione di *full scale*) potrà consentire di agire in prossimità dell'area sorgente del plume, laddove lo spessore di acquifero interessato è ragionevolmente più ridotto, monitorando le concentrazioni di manganese presenti nelle acque di falda in corrispondenza dei piezometri interni di stabilimento posti in zona A.

Il campo prova sarà costituito da 1 pozzo di insufflaggio e da 3 piezometri di monitoraggio dotati di testa stagna. Le caratteristiche dell'impianto sono descritte al § 5.8.

5.9.1

Monitoraggio

I parametri che verranno monitorati nel pozzo *IP* e nei *MP* saranno i seguenti:

1. pressione di testa: i punti verranno attrezzati con testa stagna con tappo filettato gas con manometro. L'incremento nella pressione di testa darà indicazioni sull'estensione della zona di influenza dello *sparging*;
2. concentrazione VOC nel tubo piezometrico al di sopra del livello statico della falda la concentrazione di VOC verrà misurata mediante PID collegato alla testa dei punti di misura mediante raccordo a tenuta;
3. concentrazione gas nel tubo piezometrico al di sopra del livello statico della falda la concentrazione di O₂, CO₂, CH₄ verrà misurata mediante analizzatore gas a infrarossi collegato alla testa dei punti di misura mediante raccordo a tenuta;
4. livello piezometrico: dopo rimozione del tappo filettato o, verrà monitorata la variazione del livello piezometrico mediante freatimetro o *interface probe* per verificare l'estensione e l'entità del *mounding*;
5. parametri chimico-fisici delle acque di falda: i parametri potenziale *redox*, conducibilità elettrica, pH, temperatura, concentrazione di Ossigeno disciolto verranno misurati mediante sonda multiparametrica attrezzata con cella di flusso. La concentrazione di CO₂ verrà misurata con kit di analisi. I parametri verranno monitorati rimuovendo la testa filettata dei punti di misura e prelevando un campione d'acqua di falda mediante elettropompa d= 3", che verrà decontaminata ad ogni prelievo;
6. concentrazione dei parametri sito-specifici mediante prelievo di campioni d'acqua di falda e conferimento a laboratorio chimico certificato.

Prima di avviare la prova pilota, tutti gli strumenti utilizzati per il monitoraggio dovranno essere sottoposti a calibrazione, al fine di evitare letture non rappresentative dei parametri monitorati.

5.9.2 Programma di Prova

La prova pilota verrà realizzata secondo il seguente programma (cfr. *Tabella 5.1*):

Tabella 5.1 Programma Campo Prova Air Sparging

Giorno (numero progressivo)	Istante (tempo progressivo)	Parametri	Note
1°	avvio	Tutti i parametri	1° campionamento acque (Bianco)
	1 ora	P testa, livello piezometrico, VOC, gas interstiziali	
	2 ore	P testa, livello piezometrico, VOC, gas interstiziali	
	5 ore	P testa, livello piezometrico, VOC, gas interstiziali	
	8 ore	Tutti i parametri	2° campionamento acque
2°	24 ore	P testa, livello piezometrico, VOC, gas interstiziali	
	28 ore	P testa, livello piezometrico, VOC, gas interstiziali	

Giorno (numero progressivo)	Istante (tempo progressivo)	Parametri	Note
	32 ore	Tutti i parametri	3° campionamento acque
3°	48 ore	P testa, livello piezometrico, VOC, gas interstiziali	
	56 ore	Tutti i parametri	4° campionamento acque
5°	96 ore	Tutti i parametri	5° campionamento acque
8°	144 ore	Tutti i parametri	6° campionamento acque
12°	264 ore	Tutti i parametri	7° campionamento acque
12°	264 ore	-	Spegnimento insufflaggio
14°	312 ore	Tutti i parametri	8° campionamento acque

5.10

CARATTERISTICHE IMPIANTO FULL-SCALE

L'impianto *full scale* di *Air-Sparging* sarà costituito complessivamente da 5 pozzi di insufflaggio ubicati nella porzione sud-orientale della zona B di stabilimento.

I pozzi saranno posizionati alla distanza di 8 m l'uno dall'altro, in modo che le zone di influenza di ciascun punto di insufflaggio si sovrappongano parzialmente interessando la porzione di monte del plume di Manganese rilevato sulla base dei monitoraggi della falda eseguiti nel 2007 e nel 2008 (cfr. *Figure 16 e 17*).

L'insufflaggio di aria potrà avvenire in maniera discontinua, secondo modalità che verranno definite a seguito del Test Pilota, al fine di sfruttare i meccanismi di non equilibrio descritti al § 5.2.

In funzione dei risultati del campo prove di *Air Sparging*, ci si riserva di apportare eventuali modifiche allo schema di cui sopra, volte all'ottimizzazione del sistema previsto.

Per il monitoraggio dell'impianto full-scale verrà effettuato un monitoraggio periodico dei dati riportati al § 5.9.1, inclusi 4 campionamenti annuali complessivi delle acque di 1 dei piezometri di monitoraggio MP.

In aggiunta, si prevede uno specifico monitoraggio in corrispondenza di alcuni piezometri presso interni allo stabilimento, in corrispondenza dei quali verranno eseguite misure periodiche dei parametri chimico-fisici e chimici delle acque di falda, con lo scopo di monitorare gli effetti del trattamento (cfr. § 6.1.4). Verranno inoltre prodotti dei rapporti periodici per illustrare l'andamento delle attività.

5.11

COMPUTO METRICO ESTIMATIVO

Di seguito si riporta il computo metrico estimativo per la realizzazione dell'impianto di *Air-Sparging*.

Tabella 5.2 *Air Sparging - Computo Metrico Estimativo*

Articolo	Descrizione	Importo
A	<i>Installazione Impianto per Campo Prove</i>	
A1	Installazione 1 Pozzo Insufflaggio	€ 4.480
A2	Installazione 3 Piezometri di Monitoraggio	€ 11.600
A3	Supervisione Installazione	€ 4.000
B	<i>Esecuzione Test Pilota</i>	
B1	Supervisione /Campionamenti	€ 8.800
B2	Analisi di Laboratorio (21 campioni acque di falda)	€ 8.500
B3	Elaborazione Dati e Implementazione Progettuale	€ 9.000
C	<i>Implementazione Impianto Full Scale</i>	
C1	Installazione 4 Pozzi Insufflaggio Addizionali	€ 18.000
C2	Installazione Sistema Iniezione	€ 8.000
C3	Supervisione Installazione	€ 8.800
D	<i>Monitoraggio Annuale</i> (Prelievo e analisi 4 campioni acque di falda)	€ 5.000

5.12

CRONOPROGRAMMA DEGLI INTERVENTI

Facendo riferimento al piano d'intervento sopra riportato, si evidenzia come l'avvio dell'installazione dell'impianto di Air Sparging possa avvenire entro 60 giorni dall'approvazione del presente documento.

La durata delle attività di installazione degli impianti per il campo prove, di esecuzione del test pilota e di elaborazione dei dati è pari a 120 giorni dall'inizio dei lavori di campo.

L'implementazione dell'impianto *full scale* di Air Sparging potrà essere effettuata entro 90 giorni dal completamento della verifica progettuale di cui sopra.

6.1 *PIEZOMETRI INTERNI ALLO STABILIMENTO*

Al fine di monitorare lo stato qualitativo della falda, si prevedono le seguenti attività:

- Campagna Annuale di Monitoraggio Idrochimico
- Determinazioni Mensili per Arsenico
- Monitoraggio della Barriera Idraulica
- Monitoraggio dell'*Air Sparging*
- Eventuali Monitoraggi Aggiuntivi

Nei seguenti paragrafi si riportano in dettaglio le attività di monitoraggio previste.

6.1.1 *Campagna Annuale di Monitoraggio Idrochimico*

Si prevede l'esecuzione di una campagna piezometrica ed idrochimica annuale su tutti i 21 piezometri installati presso lo stabilimento e sui 7 pozzi della barriera idraulica di progetto.

Le analisi di laboratorio sui campioni di acque di falda prelevati saranno finalizzate alla determinazione dei metalli (Arsenico, Ferro e Manganese) e dei composti sito specifici di interesse (Melamina, Formaldeide, Acetaldeide, Pentaeritrite). Le determinazioni analitiche saranno effettuate sulla base delle metodiche analitiche già in uso nell'ambito del procedimento (cfr. *Rapporto di Caratterizzazione delle Aree AMI Interne e Limitrofe al Polo Chimico di Castellanza – Olgiate Olona (ERM, Giugno 2008)*).

6.1.2 *Determinazioni Mensili per Arsenico*

Si prevede la prosecuzione del monitoraggio mensile per la determinazione dell'Arsenico in corrispondenza dei piezometri MW1bis, MW2 e MW3, attivo dall'Ottobre 2007, come da richiesta della Conferenza dei Servizi del 03/10/2007. Si propone che tale monitoraggio periodico termini all'atto dell'avviamento della barriera idraulica di cui al § 4.

6.1.3 *Monitoraggio della Barriera Idraulica*

Al fine di verificare il buon funzionamento del sistema di contenimento idraulico di cui al § 4 si prevede il seguente monitoraggio.

Con cadenza settimanale per il primo mese e successivamente con cadenza mensile, si effettuerà un campionamento delle acque dei pozzi barriera con determinazione dell'Arsenico e di alcuni composti chimici di interesse (Ferro, Manganese, Pentaeritrite, Melamina, Acetaldeide e Formaldeide).

Questa azione è mirata a:

- monitorare che le caratteristiche delle acque di falda siano compatibili con il recapito;
- seguire l'evoluzione temporale della qualità delle acque estratte dai pozzi in modo da agire con le opportune azioni correttive in caso di anomalie.

Contestualmente all'attività di campionamento, con la medesima cadenza temporale, si procederà al rilievo del livello della falda in tutti i piezometri presenti nelle Zone A e B di stabilimento. Questa azione permetterà di rilevare i dati per la valutazione, tramite il modello idraulico di cui ai paragrafi precedenti, dell'efficacia idraulica della barriera.

Infine, semestralmente, verrà predisposto un rapporto che illustrerà i dati raccolti, i risultati delle elaborazioni in termini di efficacia idraulica e chimica della barriera, le modalità di esercizio dei sistemi di sbarramento e le eventuali azioni correttive proposte o effettuate.

6.1.4 *Monitoraggio dell'Air Sparging*

Al fine di monitorare l'andamento della concentrazione in Manganese presso il sito si prevede il monitoraggio semestrale di tale sostanza in corrispondenza dei seguenti piezometri interni allo stabilimento: MW18, MW5, MW4, MW14, MW16, AS, MW3.

Ulteriori dettagli su tale attività saranno riportati nell'approfondimento progettuale di cui al § 5.10.

6.1.5 *Eventuali Monitoraggi Aggiuntivi*

Al fine di raccogliere ulteriori elementi utili al perfezionamento del quadro conoscitivo relativo alla presenza di Ferro, Manganese e Arsenico nelle acque di falda, *Chemisol* si riserva di integrare, specificamente per alcune campagne di monitoraggio da definire, il piano analitico sopra delineato mediante la determinazione delle concentrazioni inerenti alcuni parametri analitici aggiuntivi, di seguito elencati:

- Anidride Carbonica (in campo, tramite strumentazione portatile);
- Solfati;
- Nitrati;
- Fosfati;
- Alluminio;
- Carbonati;
- BOD₅;
- COD;
- TOC.

Facendo riferimento al piano d'intervento illustrato ai paragrafi precedenti, con particolare riguardo agli interventi di barriera idraulico del fronte di falda acquifera interessato da eccedenze della CSC per Arsenico, ed al trattamento di Air Sparging per l'ossigenazione dell'acquifero e la gestione del superamento delle CSC per Manganese nella porzione Centro-Orientale dello stabilimento, nel presente paragrafo viene proposto un piano di monitoraggio della qualità delle acque della falda superficiale per le aree poste immediatamente a valle del Polo Chimico Multisocietario di Castellanza – Olgiate Olona.

Tenendo conto che al confine di valle del sito sono presenti sei piezometri di monitoraggio più il pozzo denominato AS, si ritiene che tre piezometri addizionali per il controllo della falda superficiale collocati al di fuori del sedime industriale siano congrui rispetto alla finalità di monitoraggio. Tali piezometri potrebbero essere ubicati nel settore Sud-Orientale, nel settore meridionale e settore Sud-Occidentale dell'area di studio.

Si propone di impiegare a tale scopo tre piezometri o pozzi esistenti, interessanti l'acquifero superficiale ed ubicati secondo i criteri di cui sopra, da indicarsi a cura delle Autorità Locali.

In alternativa, si evidenzia che un piezometro di monitoraggio esterno sarebbe già disponibile nel settore Sud-Orientale dell'area di studio e, qualora non fossero già disponibili dei piezometri di controllo aventi le caratteristiche di cui sopra, due nuovi piezometri potrebbero essere installati a cura di *Chemisol*, in aree messe a disposizione ed indicate dalle Autorità, anche con riferimento alle necessarie procedure autorizzative per l'installazione dei piezometri in aree non di proprietà *Chemisol*.

In analogia con i piezometri realizzati all'interno del sedime industriale, i due piezometri di nuova realizzazione verrebbero perforati con diametro 127-152 mm e tubati con rivestimento in PVC di diametro 3". La profondità d'installazione prevista sarebbe pari a 60 m dal piano campagna (25 m circa al di sotto del livello piezometrico atteso), con installazione di filtri in corrispondenza dell'intero spessore saturo interessato dai piezometri.

Relativamente alle attività di monitoraggio in corrispondenza dei piezometri esterni si propone una periodicità semestrale per i primi due anni di attività dei sistemi di Messa in Sicurezza. Successivamente, il monitoraggio idrochimico sui tre piezometri esterni verrà condotto su base annuale.

Le analisi di laboratorio sui campioni di acqua di falda di previsto prelievo saranno mirate alla determinazione di alcuni metalli (Arsenico, Ferro e Manganese) e, eventualmente, dei composti sito specifici che dovessero risultare di interesse. Le metodiche analitiche da impiegarsi saranno le medesime già concordate in fase di caratterizzazione (cfr. *Rapporto di*

*Caratterizzazione delle Aree AMI Interne e Limitrofe al Polo Chimico di Castellanza –
Olgiate Olona (ERM, Giugno 2008).*

Al fine di attivare delle misure temporanee di prevenzione a tutela della matrice acque di falda, nel periodo di tempo intercorrente per il completamento e l'attivazione degli interventi di Messa in Sicurezza Operativa sopra descritti, si è verificata la possibilità di procedere all'emungimento temporaneo delle acque di falda in corrispondenza dei piezometri ad oggi disponibili lungo il confine di valle del Polo Chimico multi societario.

Considerando la disponibilità di pozzi e piezometri lungo il confine di valle del sito, sono stati presi in esame i seguenti possibili punti di emungimento:

- Pozzo Pilota PW1 (da attrezzare con impianto di sollevamento);
- Piezometri di monitoraggio MW15, MW2 and MW16 (da attrezzare con impianto di sollevamento);

La durata prevedibile per tali attività è stimabile in alcuni mesi, includendo la tempistica autorizzativa e di realizzazione degli interventi definiti nel presente documento progettuale.

Relativamente ai piezometri MW15, MW2 and MW16, , tenendo conto della prevalenza necessaria, e principalmente del diametro della tubazione di rivestimento dei piezometri, una portata di emungimento realistica viste le pompe disponibili in commercio è pari al massimo a 1,0-1,5 m³/h per ciascun piezometro.

Relativamente al pozzo pilota PW1, le prove di pompaggio hanno verificato la possibilità di procedere ad emungimento con portate crescenti (ed efficienze decrescenti) fino ad un massimo di circa 100 m³/h. Le acque emunte dal pozzo pilota PW1, possono essere impiegate all'interno del sito (cfr. § 3.4) mediante collegamento alla rete di distribuzione delle acque di pozzo di sito, in sostituzione di un'aliquota delle acque fornite dai pozzi di approvvigionamento idrico dello stabilimento.

Relativamente alle acque di emungimento dei piezometri MW15, MW2 e MW16, si prevede che con una portata massima pari a circa 1,2 m³/h, vengano prodotte acque di spurgo per un volume massimo pari a circa 15.000 m³ nell'arco di un semestre di funzionamento.

Tali acque di spurgo verranno recapitate nella rete fognaria di stabilimento (cfr. compatibilità delle acque per il recapito, indicata al § 3.4) e successivamente conferite all'impianto di depurazione di sito ed infine a quello consortile.