

Politecnico di Torino



**Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile**

**Studio numerico di mitigazione dell'intrusione
salina in un contesto industriale costiero**

Relatore

Chiar.mo Prof. Marco Barla

Candidato

Claudia Anastasi

Correlatore

Ing. Matteo Baralis

Correlatore esterno

Dott. Davide Gori

Ing. Dario Sardano

Marzo 2020

*I correlatori esterni sono dipendenti della società Amec Foster Wheeler Italiana S.r.l. (gruppo Wood), consulente ambientale di RAM.

[...] Qualunque cosa farai, amala,
come amavi la cabina del Paradiso quando eri picciriddu.
(dal film *Nuovo Cinema Paradiso*)

*Alla mia Famiglia
Il mio porto sicuro
In cui trovo sempre consiglio, confronto e conforto*

SOMMARIO

Lo studio degli acquiferi e della loro interazione con le infrastrutture e con le attività antropiche è di grande attualità e importanza. Per tenere conto dell'elevato numero di parametri che intervengono nell'analisi di un acquifero e del sottosuolo, oggi si ricorre sempre più ai modelli numerici. Infatti, la modellazione numerica permette di integrare tutti gli elementi presenti nell'area di studio e simulare molteplici scenari, in modo da individuare le migliori soluzioni progettuali.

In particolare, con riferimento agli acquiferi costieri, uno dei principali aspetti da considerare è quello dell'intrusione salina, definita come l'avanzamento dell'acqua del mare verso l'entroterra nel sottosuolo. L'equilibrio naturale dell'interfaccia tra il mare e l'acquifero, infatti, può modificarsi a causa di attività antropiche quali, ad esempio, il prelievo dell'acqua di falda attraverso pozzi. Ciò deprime localmente il livello dell'acquifero e genera un cono di emungimento che richiama l'acqua salata fino al raggiungimento di una nuova situazione di equilibrio.

In questo contesto si inserisce il lavoro di tesi che ha come obiettivo lo studio dell'intrusione salina nel sottosuolo della Raffineria di Milazzo (RAM). Gli impianti della RAM, infatti, insistono su una zona pianeggiante limitrofa al mare del Golfo di Milazzo sulla costa settentrionale della Sicilia. Considerate le dimensioni e l'entità del ciclo produttivo del polo industriale, l'opificio necessita ingenti quantitativi di acqua dolce, nell'ordine di 1 000 m³/h. Questa viene in gran parte emunta da pozzi presenti all'interno della Raffineria. L'emungimento consente anche di monitorare la qualità delle acque sotterranee. Infatti, i pozzi intercettano il flusso d'acqua proveniente da monte che, altrimenti, potrebbe recapitare a mare gli eventuali contaminanti presenti nel sottosuolo del sito. L'acqua intercettata, una volta emunta e analizzata, se necessario può essere sottoposta a trattamento e successivamente è reimpressa in falda.

Nel lavoro di tesi, il complesso sistema idrico della Raffineria è stato rappresentato mediante un modello numerico che ha permesso di ricostruire l'andamento del cuneo salino in funzione dell'emungimento in condizioni di alto (tra aprile e ottobre) e basso piezometrico (tra novembre e marzo). Sono stati così determinati i valori critici di emungimento che comportano un avanzamento del cuneo salino non sostenibile dal punto di vista ambientale e del ciclo produttivo. Per contenere questo fenomeno, è stata individuata come soluzione la realizzazione di una barriera di pozzi di re-immissione in prossimità della linea

di costa. Anche per questo nuovo scenario, il modello e le simulazioni numeriche hanno dimostrato che l'iniezione di acqua dolce può ripristinare le condizioni naturali, evitando l'eccessiva depressione della falda e l'avanzamento dell'acqua di mare nonostante l'emungimento. Inoltre, è stato possibile verificare l'efficacia della batteria di pozzi per il controllo della qualità delle acque sotterranee e individuare un piano di esercizio del sistema idrico della Raffineria, mediante la gestione delle portate di emungimento e re-immissione che garantiscono la sostenibilità dello sfruttamento idrico, sia in alto che in basso piezometrico.

La gestione ottimale del sistema idrico non può prescindere da un costante monitoraggio del livello e della concentrazione salina della falda, attraverso misure piezometriche e campionamenti.

INDICE

SOMMARIO	I
1 INTRODUZIONE	1
1.1 Obiettivi della tesi e inquadramento dell'area di studio	1
1.2 Struttura della tesi	3
2 PRESENTAZIONE DELLA RAFFINERIA DI MILAZZO E CARATTERIZZAZIONE IDROGEOLOGICA DEL SITO	6
Premessa	6
2.1 Intrusione salina negli acquiferi costieri.....	7
2.1.1 Posizione della superficie d'interfaccia.....	9
2.1.2 Forma della superficie d'interfaccia.....	11
2.1.3 Emungimento da acquiferi costieri	12
2.2 Presentazione della Raffineria di Milazzo.....	14
2.2.1 Storia della Raffineria.....	14
2.2.2 Struttura organizzativa aziendale	15
2.2.3 Sistema logistico dello stabilimento e descrizione dei prodotti	16
2.3 Gestione idrica della Raffineria	19
2.3.1 Fonti di approvvigionamento idrico.....	19
2.3.2 Impianto Trattamento Acque.....	20
2.3.3 Messa In Sicurezza della falda	21
2.3.4 Messa in Sicurezza Operativa	24
2.4 Caratterizzazione idrogeologica del sito.....	30
2.4.1 Assetto geologico e litostratigrafico.....	32
2.4.2 Caratterizzazione idrica del sito	34
Sintesi.....	38
3 DESCRIZIONE DEL METODO AGLI ELEMENTI FINITI E DEL CODICE DI CALCOLO FEFLOW	40
Premessa	40
3.1 Introduzione all'analisi numerica e al software FEFLOW.....	41
3.2 Descrizione del metodo agli elementi finiti.....	42
3.3 Equazioni risolutive e algoritmi di calcolo del software FEFLOW	46
3.3.1 Equazione del moto del flusso	46
3.3.2 Equazione del moto del flusso in un mezzo completamente saturo	48
3.3.3 Equazione di trasporto.....	48

3.3.4	Analisi in condizioni “densità dipendenti”	50
3.3.5	Risoluzione stazionaria e transitoria delle equazioni	52
3.4	Definizione delle condizioni iniziali e al contorno	53
	Sintesi.....	55
4	SVILUPPO DEL MODELLO AGLI ELEMENTI FINITI PER LO STUDIO DELL’INTRUSIONE SALINA	56
	Premessa	56
4.1	Scelta della geometria del modello e dell’acquifero.....	57
4.1.1	Schematizzazione planimetrica e altimetrica della geometria del modello	59
4.1.2	Schematizzazione dell’acquifero e descrizione dei pozzi	59
4.2	Costruzione della mesh e discretizzazione spaziale del dominio di calcolo	60
4.3	Impostazione delle condizioni iniziali e al contorno	63
4.4	Proprietà del terreno e determinazione della conducibilità idraulica	67
4.5	Valutazione dell’estensione del modello nella direzione nord – sud	69
	Sintesi.....	72
5	ELABORAZIONE DELLE SIMULAZIONI E ANALISI DEI RISULTATI	74
	Premessa	74
5.1	Analisi di flusso e validazione del modello	75
5.2	Analisi dell’avanzamento del cuneo salino	84
5.3	Determinazione delle portate e piano di gestione.....	90
5.4	Confronto tra le portate di progetto e simulate	100
5.5	Studio del trasporto in falda	101
5.6	Piano di monitoraggio della falda	105
	Sintesi.....	109
6	CONCLUSIONI	111
	BIBLIOGRAFIA	117
	SITOGRAFIA.....	118
	FIGURE	119
	TABELLE	122
	ALLEGATI	123
	RINGRAZIAMENTI	139

1 INTRODUZIONE

1.1 Obiettivi della tesi e inquadramento dell'area di studio

Il lavoro di tesi è stato svolto presso la Raffineria di Milazzo (RAM), impianto di raffinazione di grezzo tra i più complessi ed estesi d'Europa. L'obiettivo della trattazione è lo studio del sistema idrico dell'opificio, con particolare riferimento alla modellazione numerica di una porzione del sito con il metodo agli elementi finiti, al fine di analizzare il fenomeno dell'intrusione salina in funzione dell'emungimento dalla falda tramite pozzi e della re-immissione d'acqua dolce nell'acquifero. Infatti, il consistente e continuo prelievo d'acqua all'interno del sito deprime il livello della falda acquifera, consentendo all'acqua del mare di spingersi verso l'entroterra, con conseguenze dannose sia ambientali che industriali.

Il sito della Raffineria di Milazzo, insistendo su una zona pianeggiante in prossimità della costa, risulta particolarmente sensibile al fenomeno dell'intrusione salina a seguito dell'attività di emungimento dalla falda che ha lo scopo di:

- Soddisfare il fabbisogno idrico dell'opificio per usi industriali, civili e di sicurezza;
- Controllare la qualità delle acque sotterranee intercettando il flusso d'acqua proveniente da monte che, altrimenti, potrebbe recapitare a mare gli eventuali contaminanti presenti nel sottosuolo del sito.

Per le dimensioni e l'entità del ciclo produttivo del polo industriale, l'opificio, quotidianamente, necessita migliaia di m³ d'acqua. L'acqua, infatti, viene utilizzata per il raffreddamento degli impianti, per la produzione di acqua demineralizzata per poi generare vapore per il riscaldamento dei fluidi di

processo, per la bonifica delle apparecchiature, per l'alimentazione del sistema antincendio e per usi civili. Visti i volumi in gioco, per la sostenibilità ambientale e del ciclo di lavorazione risultano di fondamentale importanza il controllo, l'ottimizzazione dei consumi e la massimizzazione dei recuperi d'acqua. In quest'ottica giocano un ruolo importante gli impianti di Trattamento Acque che trattano l'acqua reflua permettendone in buona percentuale il riutilizzo, mentre il resto viene scaricato a mare.

Per realizzare questo processo di minimizzazione dell'impatto sul sistema idrico locale, la Raffineria di Milazzo, a partire dal 2008, ha affidato alla società *Wood Amec Foster Wheeler Italiana S.r.l. - Environmental Division* lo studio per la redazione di un piano di miglioramento della gestione idrica, in accordo con le direttive del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM), dell'Agenzia Regionale Protezione Ambiente (ARPA) e dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA).

Inizialmente, il fabbisogno idrico della RAM era garantito esclusivamente da una rete di 24 pozzi industriali (di cui 15 ancora oggi attivi) realizzati insieme ai primi impianti. Ingressi secondari erano rappresentati dall'acquedotto comunale per usi civili e dal mare (in caso di emergenza). Successivamente, con l'aumento dell'attenzione sugli aspetti ambientali, intorno alla fine degli anni '90 gli impianti di trattamento sono stati migliorati per consentire un parziale riutilizzo dell'acqua trattata; è stato inoltre siglato un contratto di fornitura di acqua demineralizzata e vapore con la limitrofa centrale "Termica Milazzo" che ha un ciclo di cogenerazione e dissalazione.

Nel 2008, in seguito alle indicazioni previste dall'Autorizzazione Integrata Ambientale, è stato avviato il Progetto di Messa In Sicurezza della falda (MIS), con lo scopo di controllare la qualità dell'acqua di falda. Il MIS è costituito da 14 pozzi di emungimento che, oltre per il soddisfacimento del fabbisogno idrico, hanno la funzione di captare le acque sotterranee che arrivano da monte e che, altrimenti, attraverserebbero il sottosuolo della Raffineria prima di giungere a mare. Poiché tali acque potrebbero contenere contaminanti di cui si vuole impedire appunto il deflusso in mare, è stata imposta la realizzazione del MIS che si configura, pertanto, come un sistema di emungimento, monitoraggio e prevenzione.

Dovendo garantire al contempo il controllo della qualità dell'acqua di falda e il soddisfacimento dell'approvvigionamento idrico, l'emungimento potrebbe essere spinto verso valori di portata elevati e insostenibili per il conseguente fenomeno

dell'intrusione salina. Per questo motivo, nel 2012 il Progetto MIS è stato integrato con il Progetto di Messa in Sicurezza Operativa (MISO), la cui realizzazione, dopo un lungo iter burocratico e amministrativo di approvazione, è iniziata da pochi mesi. Il sistema MISO prevede, oltre al miglioramento dell'efficacia della barriera idraulica esistente con la costruzione di 4 nuovi pozzi di emungimento e 2 piezometri, il controllo del cuneo salino.

L'innovazione introdotta con il MISO è infatti rappresentata dalla realizzazione di una barriera di re-immissione d'acqua in falda costituita da 48 pozzetti collocati sul fronte mare, il cui compito è quello di ripristinare l'equilibrio fisico-chimico della zona di transizione tra la falda e il mare in prossimità della linea di costa, per evitare l'intrusione del cuneo salino. Il consistente e continuo prelievo d'acqua, attività assolutamente indispensabile per le esigenze di un polo industriale come la Raffineria di Milazzo e per il controllo della falda stessa, deprime il livello dell'acquifero consentendo all'acqua del mare di spingersi verso l'entroterra, con conseguenze dannose sia ambientali che industriali. La barriera di re-immissione, ripristinando il livello dell'acquifero in prossimità della costa, permette di ottenere l'arretramento del cuneo salino.

Il lavoro di tesi si pone come obiettivo principale proprio lo studio dell'andamento del cuneo salino in funzione dell'emungimento prima e della re-immissione dopo, individuando anche un piano di gestione delle portate (sia di emungimento che di re-immissione) per evitare l'intrusione dell'acqua salata. Poiché il sito della Raffineria di Milazzo presenta notevoli variazioni dell'andamento del carico idraulico con la stagionalità, lo studio del fenomeno è condotto in condizioni di alto e basso piezometrico (aprile – ottobre alto piezometrico, novembre – marzo basso piezometrico). Il periodo di basso piezometrico è successivo all'estate quando si registra la quasi totale assenza di precipitazioni. In conseguenza di ciò, la falda risente della diminuzione del flusso d'acqua in arrivo da monte che risulta invece abbondante dopo i mesi invernali, determinando, tra aprile e ottobre, un innalzamento del livello della falda (condizione di alto piezometrico).

1.2 Struttura della tesi

La tesi è strutturata in sei capitoli.

Dopo una breve introduzione, il Capitolo 2 sarà dedicato alla descrizione della Raffineria di Milazzo. In dettaglio, nel paragrafo 2.1 sarà illustrato il fenomeno dell'intrusione salina e l'effetto dell'emungimento sull'avanzamento del cuneo. Il

paragrafo 2.2 riporterà una presentazione d'insieme dell'azienda con particolare riferimento alla storia, agli impianti, alle strutture dell'opificio e ai suoi prodotti, al fine di inquadrare la realtà cui ci si riferisce nel corso della trattazione. Il paragrafo 2.3 descriverà la gestione idrica della Raffineria, attenzionando le fonti di approvvigionamento, i recapiti e gli impianti di trattamento acque; verranno inoltre elencati i cambiamenti della gestione idrica via via introdotti fino alla realizzazione dei pozzi di emungimento e di re-immissione in falda previsti dai Progetti di Messa in Sicurezza (MIS) e di Messa in Sicurezza Operativa (MISO). Nel paragrafo 2.4, invece, si riporteranno i dati relativi alla caratterizzazione idrogeologica dell'area di studio, in termini geologici e litostratigrafici, con riferimento anche all'assetto idrico di superficie e del sottosuolo. Tali informazioni risulteranno indispensabili per la definizione delle caratteristiche e delle proprietà del modello numerico costruito per l'analisi dell'avanzamento del cuneo salino, affinché il modello stesso riesca a rappresentare in modo schematico e attendibile la realtà e i suoi fenomeni.

Il Capitolo 3 tratterà sia il metodo numerico agli elementi finiti sia le equazioni risolutive di flusso e trasporto in falda utilizzate dal codice di calcolo *FEFLOW 7.202 (DHI-WASY GmbH)*. I concetti teorici riportati sottolineano la complessità e la potenza della modellazione numerica, fornendo inoltre gli strumenti necessari per comprendere più nel dettaglio gli algoritmi e le impostazioni del software *FEFLOW*, apprezzandone maggiormente i risultati.

Il Capitolo 4 illustrerà la costruzione del modello numerico che schematizza una porzione del sito della Raffineria, al fine di simulare e analizzare il fenomeno dell'avanzamento del cuneo salino. In particolare, oltre a commentare le impostazioni di base, le condizioni al contorno e iniziali settate nel software, si motiverà la scelta della geometria del modello. Essa sarà definita prendendo in considerazione sia i dati acquisiti in Raffineria sia i risultati delle simulazioni condotte, in modo da individuare le dimensioni minime del modello che riproduce correttamente la realtà, ciò per minimizzare i costi computazionali ottenendo comunque output attendibili.

Il Capitolo 5 presenterà le analisi di flusso e trasporto in falda effettuate in condizioni di alto e basso piezometrico, al fine di studiare il fenomeno dell'avanzamento del cuneo salino in differenti scenari di emungimento, valutando poi gli effetti della batteria di re-immissione in falda e l'efficacia della soluzione individuata per evitare l'intrusione salina e per garantire la qualità dell'acquifero.

Il Capitolo 6 sarà dedicato alle considerazioni conclusive sui risultati ottenuti e sugli obiettivi raggiunti, con particolare riferimento ai piani di esercizio delle portate di emungimento e re-immissione individuati.

2 PRESENTAZIONE DELLA RAFFINERIA DI MILAZZO E CARATTERIZZAZIONE IDROGEOLOGICA DEL SITO

Premessa

Il seguente capitolo è dedicato alla presentazione della Raffineria di Milazzo e del sito interessato dall'avanzamento del cuneo salino. Quella di Milazzo, per volumi, è la seconda Raffineria di Italia, lavorando mediamente oltre 10 milioni di tonnellate annue di grezzo. L'approvvigionamento della materia prima e la commercializzazione dei prodotti finiti e semilavorati avviene per il 90% via mare, verso i principali porti del Mediterraneo e d'oltreoceano.

La Raffineria di Milazzo è posta in prossimità della costa, zona in cui il sistema idrogeologico di terra interagisce con quello marino. In generale, le fasce costiere sono aree di particolare interesse ambientale, sensibili ai fenomeni naturali e alle attività antropiche. Spesso, su tali zone si sviluppano infrastrutture e insediamenti urbani e industriali che ne influenzano negativamente le condizioni iniziali. Uno dei processi che può minare l'equilibrio idrogeologico di una zona costiera è il consistente emungimento dell'acqua di falda. Tale attività, pur essendo indispensabile per soddisfare il fabbisogno idrico di un polo industriale come la Raffineria, può generare il fenomeno dell'avanzamento del cuneo salino.

Pertanto, è interessante studiare dettagliatamente la problematica dell'intrusione salina in relazione all'emungimento; ciò al fine di monitorare la concentrazione dei cloruri in falda e individuare soluzioni adeguate per contrastare tale fenomeno indesiderato, permettendo, al contempo, il prelievo d'acqua. Visto l'elevato numero di parametri interessati e la complessità che caratterizza l'analisi di un acquifero, è conveniente che lo studio dell'intrusione salina venga condotto

tramite analisi numerica.

La fase preliminare della ricerca dei dati è indispensabile nell'applicazione di ogni metodo numerico che consente di rappresentare la realtà tramite la costruzione di un modello per la simulazione dei fenomeni. Allo sviluppo del modello devono concorrere quanti più dati utili possibili; è bene, però, che gli stessi non siano superflui o ridondanti. Un modello così fatto avrà costi computazionali minimi e permetterà di ottenere risultati congruenti con le aspettative e, al contempo, di immediata interpretazione.

2.1 Intrusione salina negli acquiferi costieri

Lo studio degli acquiferi e del loro condizionamento dalle attività antropiche è, oggi, di grande attualità e importanza. In particolare, è molto interessante l'analisi degli acquiferi costieri in quanto sistemi idrogeologici sensibili al fenomeno dell'intrusione salina.

Si definisce intrusione salina o marina l'avanzamento delle acque salate dal mare verso l'acquifero costiero. Tale fenomeno, in condizioni naturali, è più evidente nell'immediata prossimità della linea di costa dove, a causa del ridotto spessore della falda e del contatto con le acque marine intruse, il processo di mescolamento interessa quasi tutto lo spessore dell'acquifero e anche i livelli più superficiali della falda possono essere contaminati dal mare. Procedendo verso l'entroterra, invece, a causa dell'incremento dei carichi piezometrici, la qualità delle acque di falda migliora, sino a raggiungere parametri chimici tipici dell'acqua dolce. In condizioni alterate, il mescolamento tra acqua salata e acqua dolce conseguente all'intrusione salina può risultare notevolmente amplificato, causando la progressiva salinizzazione della risorsa idrica sotterranea fino a renderla inutilizzabile per gli usi civili, industriali e agricoli. Ciò provoca anche il depauperamento della qualità del suolo.

Normalmente, a causa della diversa densità, l'acqua salata, più densa, fluisce al di sotto di quella dolce, formando un'interfaccia di separazione tra i due liquidi detta cuneo salino, come schematizzato nella Figura 2.1.

Semplificando il fenomeno, si può ipotizzare che l'acqua dolce si disponga sopra l'acqua salata definendo un'interfaccia netta ma, nella realtà, esiste una vera e propria zona di mescolamento o mixing zone (Figura 2.2), la cui ampiezza dipende da fenomeni di dispersione e diffusione sia verticali che orizzontali e dalle fluttuazioni marine. Lo spessore di tale zona, a salinità crescente con la

profondità, può estendersi anche per qualche decina di metri.

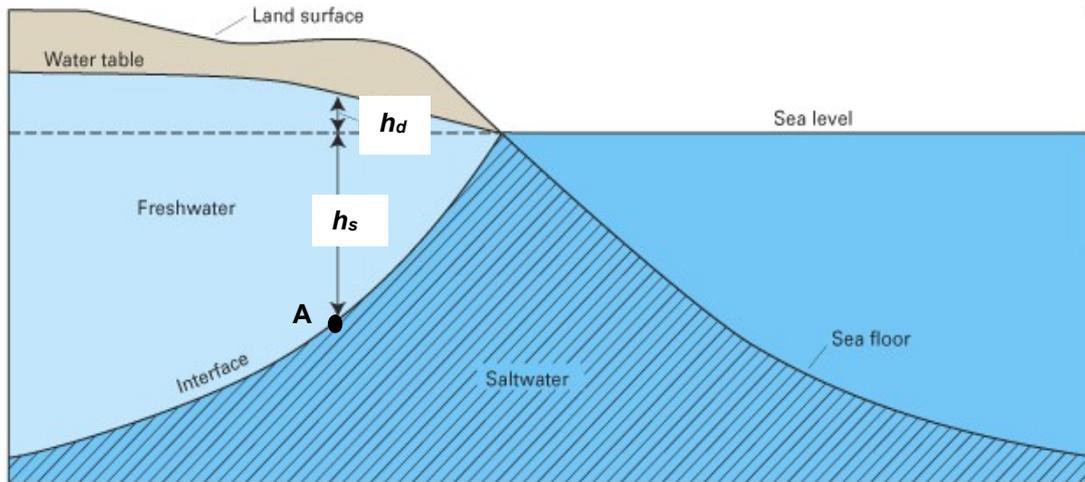


Figura 2.1 Interazione acqua dolce – acqua salata in prossimità della costa, fenomeno dell'intrusione salina

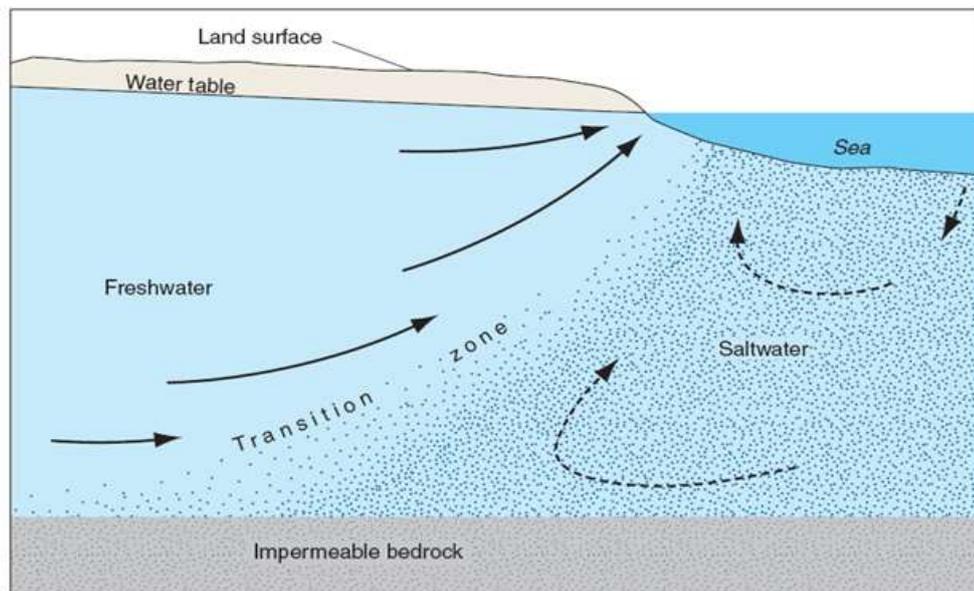


Figura 2.2 Zona di mescolamento dell'intrusione salina in un acquifero semiconfinato (Barlow, 2003)

Per lo studio dell'intrusione salina, il valore della densità dell'acqua salata introduce un ulteriore elemento di difficoltà. Infatti, se la densità dell'acqua dolce può considerarsi costante a $1\,000\text{ kg/m}^3$, quella dell'acqua salata varia con la temperatura, la salinità e la pressione della profondità a cui l'acqua si trova. Nello specifico, quest'ultimo valore diminuisce con l'aumentare della temperatura,

aumenta con l'aumentare della salinità e, a parità di tali parametri, aumenta con la profondità. In genere la densità dell'acqua salata è assunta pari a $1\,025\text{ kg/m}^3$ considerando una concentrazione salina di 35 g/l.

2.1.1 Posizione della superficie d'interfaccia

La determinazione del cuneo salino (posizione e forma) risulta complessa e solo in alcuni casi particolari è possibile ottenere una soluzione analitica in forma chiusa. Tuttavia, assumendo delle ipotesi semplificative, è possibile individuare la posizione dell'interfaccia con buona approssimazione. Un primo approccio a questa problematica fu condotto da *Ghyben* ed *Herzberg* per trovare la superficie di separazione tra l'acqua dolce e quella salata in condizioni idrostatiche. La loro trattazione si basa sulle seguenti ipotesi semplificative:

- Flusso di acqua dolce perfettamente orizzontale e quindi linee equipotenziali verticali (assunzione di *Dupuit*);
- Acqua salata in moto stazionario;
- Zona di mescolamento tra i due fluidi di spessore nullo.

Con queste ipotesi, per ogni punto A dell'interfaccia (Figura 2.1) è valida la relazione di equilibrio tra le pressioni dell'acqua dolce e di quella salata:

$$(h_s + h_d) \gamma_d = h_s \gamma_s \rightarrow h_s = \frac{\gamma_d}{\gamma_d + \gamma_s} h_d \cong 40 h_d$$

dove:

- h_s è la distanza, lungo la verticale, tra il livello del mare e l'interfaccia;
- h_d è la quota, sopra il livello del mare, dell'acqua dolce;
- γ_s è il peso specifico dell'acqua salata ($1\,025\text{ kg/m}^3$);
- γ_d è il peso specifico dell'acqua dolce ($1\,000\text{ kg/m}^3$).

Quanto ricavato permette di dire che la profondità a cui si trovano le acque salate è circa 40 volte l'altezza piezometrica dell'acqua dolce sopra il livello del mare.

Tuttavia, per l'ipotesi relativa all'orizzontalità del flusso d'acqua dolce, questo risultato perde di validità soprattutto nelle aree in prossimità della costa e del cuneo salino in generale, dove il moto si presenta "circolare" con una componente verticale rilevante e linee equipotenziali curvilinee.

Tale aspetto è mostrato nella Figura 2.3, da cui si evince che questa formulazione è conservativa. Infatti il punto A rappresenta la generica posizione dell'interfaccia ad una certa distanza dalla costa, mentre il punto B l'intersezione della linea

equipotenziale $\varphi_d = h_d$ con l'interfaccia stessa. La profondità δ_{hd} del punto B corrispondente al livello di falda h_d calcolata con la formula di Ghyben ed Herzberg è minore di quella a cui si trova l'interfaccia reale nel punto A.

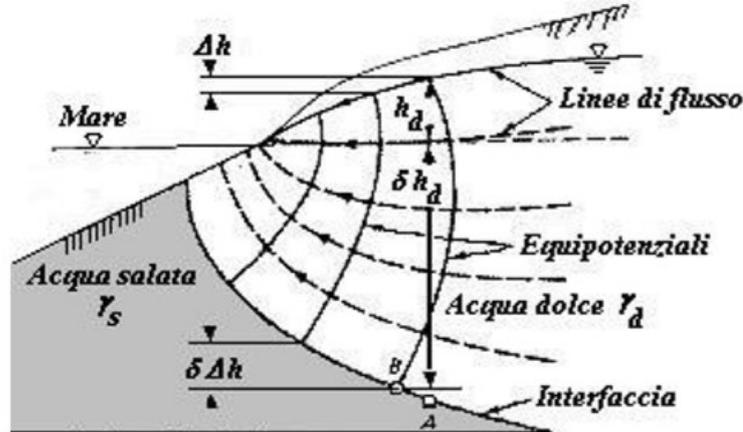


Figura 2.3 Linee equipotenziali curvilinee nella zona in prossimità della costa

Questo aspetto è stato corretto dalla relazione di Hubbert (1940) che ha proposto di utilizzare, come potenziale idraulico per il calcolo della profondità dell'interfaccia A', la quota in B' e non sulla verticale di A', come mostrato nella Figura 2.4.

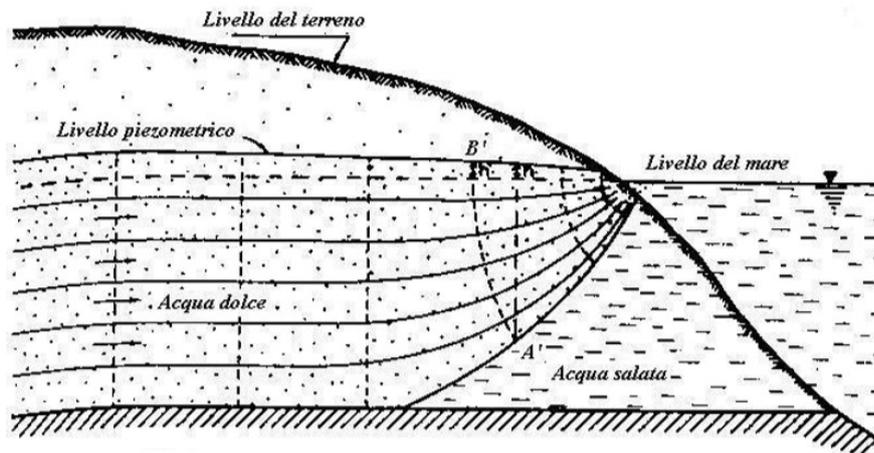


Figura 2.4 Rete di flusso in un acquifero costiero con una zona di transizione netta

Inoltre, rimuovendo anche la seconda ipotesi semplificativa e considerando cioè un flusso di acqua salata in moto non stazionario, Hubbert ha formulato un modello più attendibile che tiene conto dell'esistenza di un flusso di acqua salata verso l'entroterra, dovuto alla differenza di livello piezometrico tra l'acqua di mare nell'acquifero e il livello del mare. Ipotizzando di posizionare un piezometro appena sopra la superficie di interfaccia e un altro immediatamente sotto, nel primo si avrebbe un livello d'acqua dolce h_d maggiore di quello del mare, nel

secondo un livello dell'acqua salata h_s negativo. In tal modo, la profondità dell'interfaccia $I(x,y,z)$ risulta:

$$I(x, y, z) = \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_d} h_s - \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_d} h_d = (1 + \delta) h_s - \delta h_d$$

Tale espressione, nota come formula di *Hubbert*, pur eliminando le prime due ipotesi semplificative di *Ghyben* ed *Herzberg*, considera sempre il caso dell'interfaccia con spessore nullo. Detta semplificazione è stata rimossa da *Luszczynski* e *De Wiest* che hanno ottenuto una formulazione analitica sufficientemente attendibile per la determinazione puntuale della posizione del cuneo salino. Tuttavia, considerando la complessità del fenomeno e l'elevato numero di variabili che intervengono, per lo studio dell'intrusione salina risulta conveniente affidarsi all'analisi numerica che, tra gli innumerevoli vantaggi, offre la restituzione di un output tridimensionale.

2.1.2 Forma della superficie d'interfaccia

Per lo studio della forma della superficie d'interfaccia, si fa riferimento alla condizione di stazionarietà che impone, in prossimità dell'interfaccia, che l'acqua dolce e l'acqua salata si muovano con velocità parallele all'interfaccia stessa; le velocità sono proporzionali ai relativi potenziali e alla permeabilità del terreno rispetto all'acqua dolce e a quella salata. Per descrivere la forma dell'interfaccia, si considerano nuovamente le ipotesi semplificative di flusso dolce orizzontale, stazionario e perpendicolare alla costa supponendo:

- Uno spessore dell'acquifero costante D ;
- Una ricarica superficiale uniforme N ;
- Un sistema di riferimento x con origine nel punto di intersezione tra la base dell'acquifero e il piede dell'interfaccia.

Tale scenario è schematizzato nella Figura 2.5. In questo caso, dal calcolo della portata di acqua dolce che attraversa la sezione in $x = 0$, si ricava una forma parabolica dell'interfaccia. In particolare, per $x = L$ e $h_d = 0$, si ottiene la portata Q_0 di seguito indicata:

$$Q_0 = \frac{kD^2 (1 + \delta)}{2L} \frac{NL}{\delta^2} - \frac{NL}{2}$$

dove, oltre ai valori prima introdotti, compaiono la permeabilità del terreno k e la quantità δ dipendente dallo spessore dell'acquifero. Dalla relazione si evince che, per valori elevati di portata, l'estensione L del cuneo salino diminuisce. Tale

aspetto è di fondamentale importanza perché rende evidente la relazione tra l'intrusione del cuneo salino e la portata della falda da monte, cioè esplicita il concetto secondo cui se la portata da monte è depauperata (ad esempio da attività antropiche), inevitabilmente il cuneo salino avanza verso l'entroterra.

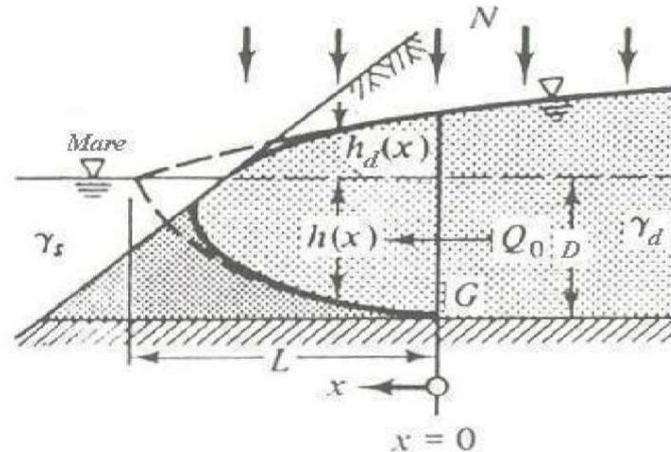


Figura 2.5 Schematizzazione dell'acquifero in prossimità della costa secondo le assunzioni di Dupuit

2.1.3 Emungimento da acquiferi costieri

Come detto precedentemente, l'interfaccia acqua dolce – acqua salata è caratterizzata dall'equilibrio delle colonne di acqua dolce e acqua salata. Per cui, una variazione del potenziale d'acqua dolce genera una variazione di quello ad acqua salata e viceversa, in modo da ritrovare una nuova condizione di equilibrio. Questo meccanismo dimostra che l'intrusione salina si ha, oltre che in modo spontaneo per la presenza di fluidi miscibili a diversa densità, anche a seguito della depressione della falda, risultando, in quest'ultimo caso, un fenomeno più evidente. La depressione del livello della falda si può verificare, principalmente, per le attività antropiche; di seguito, si elencano le più importanti:

- Emungimento dall'acquifero di una quantità maggiore della ricarica idrica;
- Modifiche della linea di costa dovute all'urbanizzazione e alla "cementificazione" del terreno che, riducendo l'infiltrazione dell'acqua nel sottosuolo, non consentono la naturale ricarica dell'acquifero;
- Realizzazione di opere sotterranee che possono modificare la piezometria del sito.

Oltre che dall'abbassamento del livello della falda di acqua dolce, il fenomeno dell'intrusione salina può essere generato anche dall'innalzamento medio del livello del mare (provocato ad esempio dal riscaldamento globale). In entrambi i

casi l'intrusione salina si manifesta sempre quando nasce un gradiente positivo di pressione, in questo caso dal mare verso la falda, modificando l'equilibrio iniziale del sistema idraulico e compromettendo la qualità delle acque sotterranee.

Nel caso del prelievo di acqua attraverso pozzi, una gestione scorretta della risorsa idrica sotterranea può aumentare in modo esponenziale l'entità del problema dell'intrusione salina negli acquiferi costieri. L'emungimento genera la locale depressione della falda in corrispondenza dei pozzi e il conseguente richiamo di acqua salata, effetto noto come up-coning o cono di intrusione (Figura 2.6).

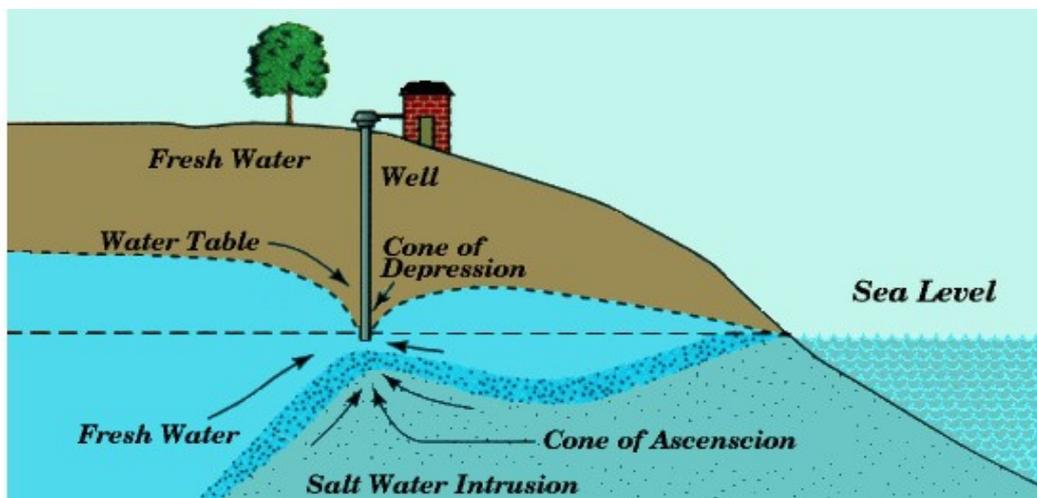


Figura 2.6 Intrusione salina a seguito di emungimento dalla falda con pozzi

Il grado e l'estensione del cono di intrusione dipendono da innumerevoli fattori tra cui le proprietà idrogeologiche dell'acquifero, il tasso e la durata di prelievo, la posizione iniziale dell'interfaccia, il tasso di ricarica della zona, la geometria e le dimensioni del pozzo e la presenza di impianti di re-immissione. In quest'ultimo caso, l'attivazione di un sistema di re-immissione di acque dolci nell'acquifero determina il rialzamento del livello di falda e la conseguente regressione del fronte salino. È quindi semplice intuire che, modulando opportunamente le portate di re-immissione, è possibile contrastare efficacemente l'intrusione salina.

Nel presente lavoro di tesi, lo studio dell'avanzamento del cuneo salino e della sua mitigazione tramite la re-immissione in falda è stato condotto presso il sito della Raffineria di Milazzo, dove il fenomeno è particolarmente evidente a causa del consistente emungimento. Di seguito, si riportano le informazioni relative alla Raffineria e alla zona in cui lo stabilimento si trova, per meglio inquadrare l'area oggetto dell'analisi.

2.2 Presentazione della Raffineria di Milazzo

La Raffineria di Milazzo S.C.p.A (RAM) è una società consortile per azioni con capitale sociale di Euro 171 143 000, il cui controllo è detenuto per il 50% da ENI e per il 50% da KUPIT. L'opificio è situato sulla costa settentrionale della Sicilia nei comuni di Milazzo e San Filippo del Mela, in corrispondenza dei bacini idrici del Torrente Corriolo-Floripotema e del Torrente Mela, con un'estensione su un'area di circa 212 ettari; si affaccia interamente sul mare del Golfo di Milazzo per circa 1 500 km.

La Raffineria lavora circa 10 milioni di tonnellate di petrolio greggio all'anno che viene approvvigionato totalmente via mare e con la stessa modalità viene spedita gran parte dei prodotti finiti (circa il 90%). Tra le raffinerie europee, quella di Milazzo è una tra le più complesse e complete in quanto è in grado di ricevere e lavorare una vasta gamma di greggi e produrre prodotti in linea con le più stringenti specifiche di qualità.

Inoltre, la Raffineria possiede impianti di conversione con tecnologie di ultima generazione. Dagli anni '90 ad oggi, infatti, la Raffineria è stata oggetto di un piano di sviluppo e di adeguamento tecnologico mirato ad ottenere elevate rese di prodotti leggeri, quindi pregiati, a scapito di prodotti pesanti quali l'olio combustibile, nel rispetto dei criteri di sicurezza e sostenibilità.

2.2.1 Storia della Raffineria

La Raffineria, in origine denominata "Mediterranea Raffineria Siciliana Petroli S.p.A." e costruita da un gruppo privato italiano a partire dal 1957, fu inaugurata il 3 Ottobre 1961. Gli impianti rimasero in esercizio fino al 1979 quando, a causa della crisi energetica scoppiata in seguito alla rivoluzione iraniana e al conseguente rialzo del prezzo del petrolio, vennero fermati. Ne scaturì una forte crisi occupazionale che ebbe risvolti nazionali; infatti, con l'intervento del governo, nel Marzo 1982 Agip Petroli rilevò a costo zero il pacchetto azionario della Mediterranea riavviando la Raffineria.

Nel 1987 la ragione sociale cambiò in "Raffineria Mediterranea S.p.A" per diventare, nel 1995, "Raffineria di Milazzo S.p.A." Quest'ultimo cambiamento fu fatto per rendere possibile, nel 1996, la joint venture tra Agip Petroli (AP) e Kuwait Petroleum Italia (Kupit); da quel momento, i due Processori hanno coniato l'acronimo RAM per definire la Raffineria.

Nel 2000 la Raffineria modificò ancora la sua denominazione sociale diventando Raffineria di Milazzo S.C.p.A. (Società Consortile per Azioni). In seguito all'incorporazione di Agip Petroli in Eni S.p.A., nel 2003 quest'ultima subentrò ad Agip Petroli S.p.A. nella joint venture.

Gli Azionisti Eni S.p.A. e Kuwait Petroleum Italia S.p.A, proprietari rispettivamente del 50% del pacchetto azionario, sono gruppi industriali internazionali che, per dimensioni e importanza, rivestono un ruolo rilevante nel mercato delle compagnie petrolifere mondiali. Gli Azionisti, di fatto, portano il greggio di loro proprietà in lavorazione e successivamente ritirano e commercializzano i prodotti finiti; la RAM non è proprietaria né delle materie prime né dei prodotti finiti ed effettua esclusivamente la lavorazione del greggio i cui costi sono coperti al 50% dai due Azionisti.

L'Eni S.p.A. opera nei settori della ricerca e della produzione di gas e petrolio, del trasporto internazionale e della vendita del gas, della generazione di energia, della raffinazione e della vendita di prodotti petroliferi, della chimica, dell'ingegneria e delle costruzioni. Eni si contraddistingue, inoltre, per il proprio impegno nell'ambito dello sviluppo sostenibile.

La Kuwait Petroleum Italia S.p.A. (KUPIT) è un'affiliata della Kuwait Petroleum International, società responsabile delle attività di raffinazione e distribuzione di prodotti petroliferi al di fuori del Kuwait. Essa svolge attività commerciali nel settore della Rete (distribuzione di carburanti sulla rete stradale), dell'Extra Rete (depositi intermedi di distribuzione) e dei Lubrificanti.

2.2.2 Struttura organizzativa aziendale

La Raffineria è gestita da un Consiglio di Amministrazione nominato dall'Assemblea degli Azionisti e composto da otto membri, di cui quattro proposti da Eni e quattro da Kuwait Petroleum Italia. L'Assemblea degli Azionisti provvede alla nomina del Presidente e del Vice Presidente, conferendo ad entrambi la rappresentanza legale con possibilità di utilizzarla disgiuntamente. All'interno del Consiglio di Amministrazione vengono nominati due Amministratori Delegati cui è affidata la gestione della società, e un Direttore Generale posto a capo dello stabilimento. Gli Amministratori rimangono in carica per tre esercizi e terminano il loro mandato alla data dell'Assemblea convocata per l'approvazione del bilancio relativo all'ultimo esercizio e possono essere rieletti. L'organigramma mostrato nella Figura 2.7 schematizza la struttura organizzativa aziendale.

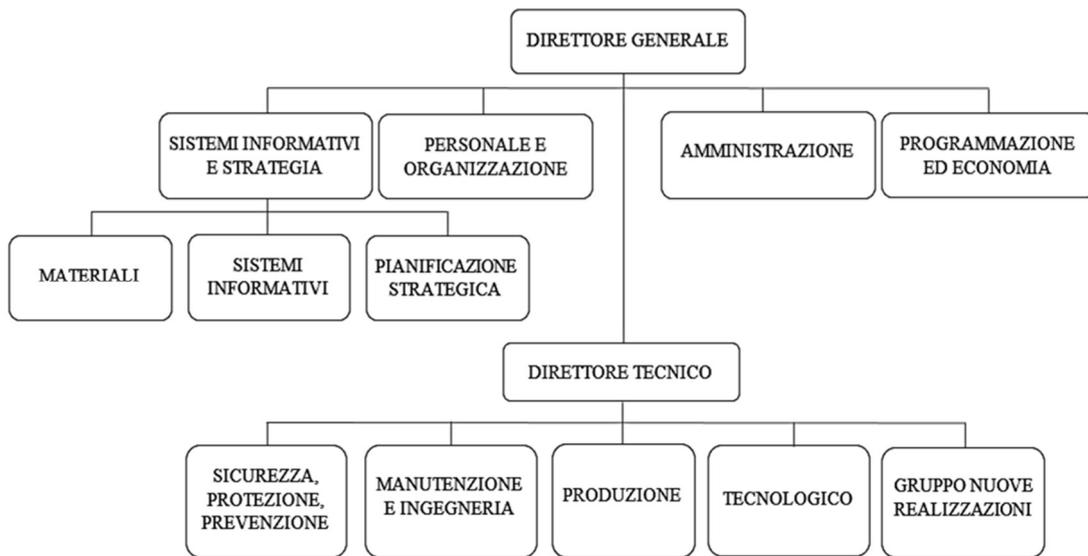


Figura 2.7 Organigramma manageriale della Raffineria di Milazzo

2.2.3 Sistema logistico dello stabilimento e descrizione dei prodotti

La Raffineria di Milazzo è situata sulla costa settentrionale della Sicilia, nei comuni di Milazzo e San Filippo del Mela, è attraversata dal Torrente Corriolo – Floripotema, ha un'estensione di circa 212 ettari e si affaccia sul Golfo di Milazzo per una fascia di arenile di circa 1 500 km. La Raffineria, oltre agli impianti di produzione, dispone anche di importanti strutture logistiche costituite da:

- Due pontili in mare aperto utilizzati per la ricezione e la spedizione dei prodotti;
- Un parco serbatoi per lo stoccaggio;
- Pensiline di carico delle autobotti per la distribuzione dei prodotti sul territorio della Sicilia nord-orientale e della Calabria.

In particolare, il parco stoccaggio è costituito da circa 170 serbatoi a tetto galleggiante per una capacità di 4 100 000 m³; per lo stoccaggio del GPL si utilizzano invece serbatoi interrati secondo quanto previsto dalle normative di sicurezza, per 16 500 tonnellate complessive. Tutti i serbatoi della Raffineria, come gli impianti, sono oggetto di un periodico programma di manutenzione che ne assicura il mantenimento in perfetta efficienza. La ricezione/spedizione dei prodotti via mare avviene attraverso i due pontili che hanno una capacità di ormeggio di sei navi contemporaneamente:

- Il Pontile 1 è lungo circa 500 m, ha due ormeggi con oleodotti dedicati ai singoli prodotti con una capacità massima di movimentazione di 2 000 t/h;

- Il Pontile 2 è lungo circa 650 m, ha quattro ormeggi con oleodotti dedicati ai singoli prodotti con una capacità massima di movimentazione di 10 000 t/h.

Ogni anno, mediamente, attraccano circa 700 navi per approvvigionare il greggio e consentire la spedizione via mare dei prodotti finiti principalmente verso i depositi costieri ENI (Palermo, Trieste, Venezia/Marghera, Civitavecchia, Gaeta, ecc.) e Kuwait Petroleum Italia (Napoli). I semilavorati, come le basi per le benzine e i prodotti per l'industria petrolchimica, vengono inviati a siti produttivi nazionali e a depositi esteri, anche oltreoceano, mentre i prodotti speciali come il propilene sono destinati principalmente in Francia e in Spagna. Circa il 10% dei prodotti finiti è spedito via terra tramite autobotti e attraverso l'oleodotto che collega la Raffineria alla vicina Centrale Termoelettrica EDIPOWER di San Filippo del Mela.

Per avere un'idea più chiara delle dimensioni e dell'organizzazione della Raffineria, si rimanda alla foto da Google Maps riportata nella Figura 2.8 e alla planimetria dell'Allegato 1. Oggi, la RAM ha 638 dipendenti diretti e circa 1 100 operatori dell'indotto che raggiungono le 2 000 unità nei periodi di fermata. Negli ultimi sei anni sono stati investiti circa 550 000 000 di Euro per implementare tecnologie avanzate negli impianti, nei sistemi di controllo e per miglioramenti ambientali. Per quanto riguarda il ciclo produttivo del polo industriale, dalla lavorazione del petrolio greggio si ottiene una vasta gamma di prodotti finiti e semilavorati, di quelli finiti gli usi sono indicati nella Tabella 2.1.

Tabella 2.1 Prodotti finiti del ciclo di raffinazione e relativi utilizzi

	PRODOTTI	USI
GPL	Deriva dai diversi processi di lavorazione, prodotto gassoso, liquefatto per stoccaggio e movimentazione	Carburante per motori, combustibile per riscaldamento e produzione di calore
PROPILENE	Idrocarburo alifatico non saturo prodotto industrialmente attraverso il cracking di idrocarburi più pesanti, per la spiccata reattività chimica legata al suo carattere non saturo	Lavorazione e produzione di polimeri, combustibile usi civili e industriali
VIRGIN NAPHTA	Si ottiene nella distillazione del greggio come frazione intermedia tra il GPL e la benzina	Lavorazione e produzione di polimeri
BENZINA	Miscela di idrocarburi additivata con prodotti antidetonanti e antiossidanti	Carburante per motori a combustione interna a scoppio
KEROSENE	Si ottiene nella distillazione del greggio come frazione intermedia tra la benzina e il gasolio	Combustibile da riscaldamento, carburante per trattori agricoli e turboreattori d'aviazione
GASOLIO	Prodotto della distillazione primaria del greggio, il nome deriva dal fatto che in passato era impiegato per ottenere il gas d'olio	Combustibile per motori Diesel e sistemi di riscaldamento
OLIO COMBUSTIBILE	Prodotto come residuo di fondo della distillazione degli impianti di conversione	Combustibile per caldaie e forni



Figura 2.8 Foto da Google Maps del sito della Raffineria di Milazzo (perimetro in rosso) e dell'area circostante

2.3 Gestione idrica della Raffineria

L'acqua è un elemento di primaria importanza per il ciclo produttivo della Raffineria di Milazzo, ovviamente non come materia prima ma come fluido di servizio che viene movimentato per migliaia di m³/h. Infatti, oltre che per usi civili, in Raffineria l'acqua è utilizzata per:

- Raffreddare gli impianti mediante un circuito di cooling water che ha una capacità di circa 20 000 m³/h con due torri di raffreddamento;
- Produrre acqua demineralizzata da impiegare nella generazione di vapore (circa 380 m³/h) che a sua volta serve per la produzione di energia elettrica, per il riscaldamento dei fluidi di processo e per la bonifica delle apparecchiature prima che vengano eseguite le operazioni di manutenzione;
- Alimentare il sistema antincendio in condizioni di non emergenza (reintegro di circa 80 m³/h).

Visti i volumi in gioco, per la sostenibilità del ciclo di lavorazione risultano di fondamentale importanza il controllo, l'ottimizzazione dei consumi e la massimizzazione dei recuperi di acqua. In quest'ottica, ha un ruolo importante l'impianto di Trattamento Acque di Processo (TAP) che depura le acque di scarico recapitate attraverso il sistema fognario. Tale trattamento permette di reimmettere nel ciclo di lavorazione (e quindi di riutilizzare) parte delle acque, mentre il resto viene scaricato a mare.

2.3.1 Fonti di approvvigionamento idrico

Per far fronte alle richieste di cui al punto precedente, l'approvvigionamento idrico avviene mediante diversi sistemi di seguito elencati:

- **Rete pozzi industriali:** costituita da 24 pozzi di cui 15 ancora attivi, realizzati insieme ai primi impianti; tale rete ha rappresentato il primo sistema di fornitura di acqua per uso industriale all'interno del processo produttivo;
- **Rete pozzi MIS:** costituita da 14 pozzi di emungimento e realizzata nel 2010 in quanto prevista dall'Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA), per impedire alle acque sotterranee che arrivano da monte e che attraversano il sottosuolo dell'area occupata dagli impianti di giungere a mare; infatti, tali acque potrebbero potenzialmente contenere inquinanti percolati dalla superficie di cui si vuole impedire il deflusso verso il mare;
- **Termica Milazzo:** acquisto di acqua demineralizzata e vapore dalla limitrofa

società Termica Milazzo;

- **Altri ingressi:** acquedotto comunale (per usi igienico-sanitari), prelievo da mare (in caso di emergenza per la rete antincendio) e acque meteoriche.

Nella Tabella 2.2 si riportano i dati relativi all'approvvigionamento idrico della Raffineria negli ultimi tre anni, secondo le informazioni ricavate dal Bilancio di Sostenibilità 2018.

Tabella 2.2 Approvvigionamento idrico RAM (Bilancio di Sostenibilità 2018)

	2016	2017	2018
ACQUA PRELEVATA (m³)	8.234.248	8.920.898	8.946.127
1° Rete di pozzi industriali	46%	49%	57%
2° Rete di pozzi MIS	35%	31%	28%
Termica Milazzo	13%	13%	10%
Altri ingressi	7%	7%	5%

2.3.2 Impianto Trattamento Acque

Le acque di scarico, insieme a quelle piovane e di lavaggio, vengono conferite e depurate nell'Impianto Trattamento Acque (TAP) che è costituito da tre sezioni: un pretrattamento, un trattamento chimico-fisico e un trattamento biologico di affinamento della qualità delle acque depurate. Nella prima sezione avviene la separazione gravimetrica (separazione dell'acqua dagli oli e dai fanghi), nella seconda viene effettuato un trattamento chimico-fisico e nell'ultima quello biologico (biodegradazione tramite batteri). Infatti, l'impianto è definito biologico perché utilizza una biofauna naturale (batteri) che si nutre degli inquinanti.

L'acqua trattata dal TAP in parte viene scaricata a mare e in parte viene riutilizzata per pressurizzare la rete antincendio e per reintegrare il circuito di raffreddamento. La qualità dell'acqua è indicata dalla quantità di ossigeno necessaria per la completa ossidazione per via biochimica e chimica dei composti organici e inorganici, tramite i parametri *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) e *Chemical Oxygen Demand* (COD).

Nella Figura 2.9 si riportano i risultati relativi all'analisi delle acque scaricate a mare negli ultimi tre anni in termini di BOD, COD, Solidi Sospesi Totali (SST) e IDROCARBURI. I dati sono espressi in mg/l; i limiti sono quelli indicati dall'Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA) e dal D.Lgs.152/06.

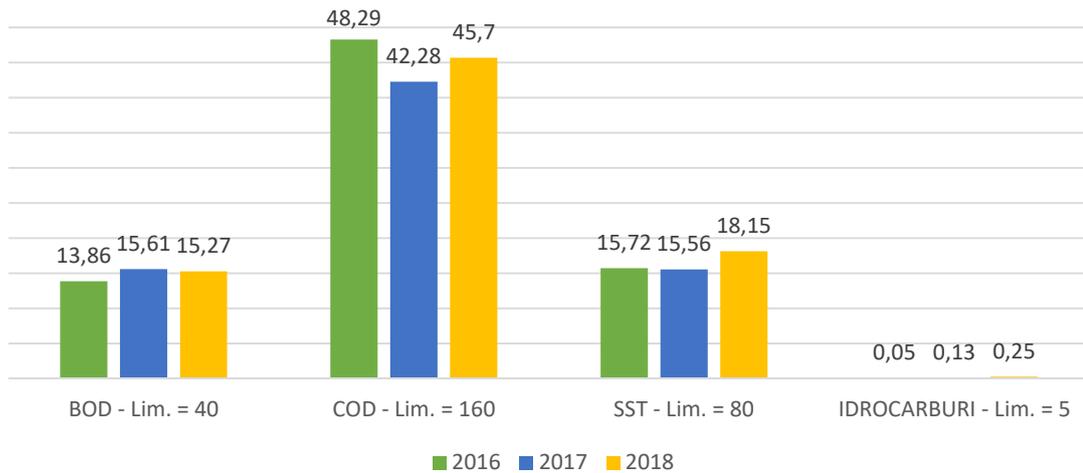


Figura 2.9 Analisi delle acque scaricate a mare (Bilancio di Sostenibilità 2018)

Secondo il Bilancio di Sostenibilità, nel 2018 la Raffineria ha scaricato a mare 5 960 786 m³ e ha riciclato e riutilizzato un quantitativo di acqua pari a 2 502 626 m³. Tale risultato è anche il frutto del revamping dell’Impianto del Trattamento Acque avvenuto nel 2016 e realizzato in conformità all’Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA).

Come tutti gli stabilimenti soggetti a controlli ambientali, infatti, anche la Raffineria di Milazzo è in possesso di un’AIA rilasciata dal Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare che ne legittima l’esercizio. L’AIA prevede una serie di adempimenti e prescrizioni alle quali la Raffineria deve attenersi, tra cui l’obbligo di monitorare il sottosuolo per rilevare eventuali presenze di idrocarburi che potrebbero provenire da infiltrazioni provocate da eventuali perdite del sistema fognario e/o di stoccaggio. A tale scopo, sistematicamente si effettuano controlli sulla qualità dell’acqua di falda utilizzando la fitta rete di piezometri presente nell’area di competenza della Raffineria, con campionamenti condotti anche in presenza dell’ARPA.

2.3.3 Messa In Sicurezza della falda

Come detto precedentemente, il sistema di Messa In Sicurezza della falda (MIS) rappresenta una delle fonti di approvvigionamento idrico della Raffineria di Milazzo. Il MIS è il primo step di un sistema di prevenzione e monitoraggio dell’eventuale contaminazione della falda che sarà completato con il Progetto di Messa In Sicurezza Operativa (MISO) illustrato nel paragrafo 2.3.4, la cui realizzazione, appena iniziata, dovrà essere ultimata entro il primo trimestre del 2021. L’ubicazione dei pozzi MIS, MISO e industriali è riportata nell’Allegato 1.

Gli interventi MIS e MISO sono stati commissionati da RAM alla società *Wood Amec Foster Wheeler Italiana S.r.l. - Environmental Division* e hanno due obiettivi principali:

- Controllare la presenza e l'evoluzione di eventuali stati di contaminazione delle acque di falda nell'area impianti della Raffineria, al fine di ottenere il progressivo miglioramento della qualità delle acque;
- Monitorare l'equilibrio fisico-chimico della zona di transizione tra la falda e il mare in prossimità della linea di costa, per evitare l'intrusione del cuneo salino.

RAM ha avviato la progettazione del primo intervento di Messa In Sicurezza della falda (MIS) per ottemperare alle richieste del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM) contenute nel Verbale della Conferenza dei Servizi "decisoria" del 6 Marzo 2008. Tale progetto prevedeva la realizzazione di un sistema di 14 pozzi di emungimento che sono stati poi costruiti lungo una linea parallela alla costa ad una distanza di circa 100 m, ad ovest della foce del Torrente Corriolo. La scelta dell'ubicazione dei pozzi è stata condotta sulla base di considerazioni relative allo stato qualitativo delle acque sotterranee, stato precedentemente determinato mediante campionamenti nella rete esistente di piezometri. Infatti, inizialmente, non erano stati previsti pozzi di emungimento nella zona ad est del Torrente Corriolo, in quanto nei pozzi/piezometri situati in tale area non erano state rilevate significative eccedenze dei parametri di interesse.

Ai sensi dell'Art. 243 del D.Lgs. 152/06, comma 1, RAM prevedeva di convogliare le acque emunte dai pozzi in un nuovo collettore appositamente realizzato che avrebbe alimentato le stesse utenze della rete dei pozzi industriali. La RAM, infatti, dispone (e disponeva già quando il Progetto MIS fu realizzato) di una rete di 24 pozzi per la captazione di acqua sotterranea per usi industriali, regolarmente autorizzati dalla concessione interministeriale n° 1589/cs del 23 Giugno 1992.

I pozzi industriali sono ubicati, in prevalenza, nel settore centro-occidentale della Raffineria e contribuiscono ad intercettare il deflusso naturale dell'acquifero verso il mare. Oggi solo 15 pozzi della rete iniziale risultano essere attrezzati per l'emungimento dell'acqua dalla falda freatica, mentre i rimanenti vengono impiegati esclusivamente per rilevare i livelli piezometrici e campionare la qualità delle acque. Le acque emunte da ciascun pozzo industriale vengono immesse in un collettore d'acciaio (facente parte di una rete di distribuzione a servizio delle

utenze industriali) per essere utilizzate nel ciclo di lavorazione della Raffineria. Oggi, in particolare, la maggior parte dell'acqua emunta dai pozzi industriali alimenta l'impianto di demineralizzazione per produrre acqua idonea ai generatori di vapore. La rimanente acqua dei pozzi, invece, è utilizzata per integrare il sistema di raffreddamento a circuito chiuso e per usi di processo o industriali. Come già detto precedentemente, comunque, negli anni la RAM ha effettuato numerosi interventi finalizzati all'ottimizzazione dell'utilizzo delle risorse idriche, alla minimizzazione dei prelievi dal sottosuolo e all'incremento del recupero dell'acqua trattata (in questo ambito si colloca il revamping dell'Impianto Trattamento Acque).

Tornando al Progetto di Messa in Sicurezza della falda, il dimensionamento preliminare del sistema di emungimento MIS è stato condotto partendo dai parametri idrogeologici rilevati nel corso di alcune prove di portata precedentemente effettuate su alcuni pozzi della Raffineria. La simulazione matematica condotta ha previsto la localizzazione di 14 pozzi lungo un fronte di circa 1 000 m parallelo alla linea di costa, con una distanza di interasse di circa 70-80 m e con una profondità di circa 30 m dal p.c. per intercettare la base dell'acquifero. Preliminarmente, si era ipotizzata una captazione massima da ogni singolo pozzo di 45 m³/h nelle condizioni più sfavorevoli (alto piezometrico, tra aprile e ottobre) e di 10 m³/h nei periodi di basso piezometrico (tra novembre e marzo).

Tali scenari risultavano definiti in base ai dati freaticometrici e storici raccolti nell'archivio della Raffineria che evidenziano, da sempre, l'estrema variabilità del livello di falda in relazione alla stagionalità. Il periodo di basso piezometrico è successivo all'estate quando si registra la quasi totale assenza di precipitazioni. In conseguenza di ciò, la falda risente della diminuzione del flusso d'acqua in arrivo da monte che risulta invece abbondante dopo i mesi invernali, determinando, tra aprile e ottobre, un innalzamento del livello della falda (condizione di alto piezometrico). Di fatto, oggi, la portata di emungimento risulta diversa da quanto ipotizzato e viene modulata in funzione delle condizioni di alimentazione dell'acquifero (in base al livello piezometrico).

La costruzione del sistema MIS è stata preceduta da una campagna di fori pilota che hanno consentito di definire la stratigrafia in corrispondenza di ciascun pozzo e le caratteristiche definitive delle opere di emungimento. Una volta realizzati, i pozzi sono stati incamiciati con una tubazione in acciaio AISI 316L da 12" e sono stati spinti fino alla base dell'acquifero (con una profondità variabile tra 29 e 36

m da p.c.). All'interno di ciascun pozzo sono stati alloggiati una pompa verticale sommersa e un tubo di calma per l'installazione di un indicatore di livello. In corrispondenza della testa di ciascun pozzo sono stati realizzati un pozzetto ed un cunicolo ispezionabile di collegamento tra la testa pozzo e il bordo strada, con all'interno le tubazioni, i cavi elettrici e strumentali. A bordo strada, per ciascun pozzo, è stata realizzata una "stazione di emungimento" che include tutte le apparecchiature meccaniche, elettriche e strumentali del pozzo (misuratore – trasmettitore di portata e manometro, quadro elettrico di comando della pompa). Insieme ai pozzi sono state realizzate anche le tubazioni di collettamento delle acque emunte e il sistema di interconnecting per un totale di circa 3 700 m di tubazioni in acciaio al carbonio, tubazioni installate fuori terra in pipe way o su pipe rack mediante adeguati supporti.

Il sistema di interconnecting ha due collettori ("Est" ed "Ovest"), ognuno dei quali è costituito da due tubazioni parallele. I due collettori si uniscono in un "pettine di smistamento" o manifold (in corrispondenza del quale sono installati due misuratori di portata) che consente di convogliare le acque emunte dai 14 pozzi verso:

- Una stazione di rilancio costituita da un serbatoio da 150 m³ dotato di pompe centrifughe che alimentano le utenze finali;
- Il circuito di raffreddamento che, dotato tra l'altro di un sistema di controllo in continuo della qualità delle acque, assorbe una portata variabile in funzione della qualità stessa.

La realizzazione dei pozzi MIS e dell'interconnecting fino al punto di smistamento è stata completata il 3 Marzo 2010; la restante parte dei lavori, incluso un sistema di monitoraggio e controllo in remoto, è stata terminata e messa in opera nell'anno successivo. Da quel momento il sistema MIS ha funzionato a regime ed è stato gestito e supervisionato da personale indicato che, attraverso la lettura dei livelli dei piezometri/pozzi e il campionamento dell'acqua emunta, modula le portate dei singoli pozzi.

2.3.4 Messa in Sicurezza Operativa

Dopo il MIS, il nuovo Decreto AIA ha previsto un ulteriore step rappresentato dal Progetto di Messa in Sicurezza Operativa (MISO) i cui lavori di realizzazione sono appena iniziati. La progettazione è stata elaborata utilizzando i dati raccolti durante l'esercizio dei pozzi MIS e valutando gli effetti indotti dagli stessi sulla falda.

La necessità di realizzare il MISO – Progetto di Messa in Sicurezza Operativa dei terreni e delle falde acquifere – è scaturita dalle analisi di rischio effettuate ai sensi del D.Lgs.152/06 (Testo unico in materia Ambientale). Tra l'altro, il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM) aveva richiesto alla RAM un "Progetto di bonifica delle acque di falda contaminate dell'intera area di Raffineria", intervento programmato da RAM già nel Luglio 2012 e successivamente presentato per l'approvazione. Nel 2017, il Progetto ha ottenuto una prima autorizzazione provvisoria dal MATTM e a Luglio 2018 è stato approvato definitivamente con il Decreto m.360/STA, documento di particolare rilievo per la RAM poiché l'area di Milazzo è riconosciuta come Sito di Interesse Nazionale (SIN). Infatti, secondo art. 242, comma 9, del D.Lgs. 152/06 e s.m.i., la Raffineria deve prevedere interventi tali da *"garantire una adeguata sicurezza sanitaria ed ambientale ed impedire un'ulteriore propagazione dei contaminanti"*. Lo stesso comma richiede che il sistema MISO sia accompagnato da un piano di monitoraggio *"dell'efficacia delle misure adottate"*.

Le opere del Progetto MISO, così come approvato dal MATTM, in accordo anche con i criteri indicati dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), prevedono di integrare e migliorare l'efficacia della barriera idraulica esistente (Rete MIS e Rete di pozzi industriali) con:

- 4 nuovi pozzi (P00, P15, P16, P17);
- 2 piezometri (MW5, S17) a Est del Torrente Corriolo con predisposizione per attività di emungimento;
- Una barriera di re-immissione in falda costituita da 48 pozzetti (da PR01 a PR48);
- Un nuovo impianto di Trattamento Acque di Falda (TAF).

Il rafforzamento del sistema di barrieramento mediante la realizzazione dei pozzi e dei piezometri è finalizzato al miglioramento dell'interruzione del flusso di eventuali contaminanti (lisciviati dal terreno insaturo o già presenti in falda in soluzione) verso il Mar Tirreno. Il MISO si configura pertanto, prima di tutto, come uno strumento di bonifica del suolo e del sottosuolo con un effetto di "ringiovanimento" del suolo o "soil rejuvenation". Invece, la realizzazione della barriera di re-immissione costituita dai 48 pozzetti serve per ostacolare l'ingresso del cuneo salino a causa della depressione del livello della falda acquifera dovuta alla captazione. In parte, le acque saranno reimmesse in falda dopo essere state trattate dal nuovo impianto Trattamento Acque di Falda (TAF) previsto dal Progetto MISO.

L'impianto di Trattamento Acque di Falda sarà realizzato con due linee parallele di trattamento per una portata totale di 430 m³/h. L'impianto TAF verrà ubicato nell'area a est del Torrente Corriolo, occupando una superficie di circa 50 m x 75 m. Le acque di falda in uscita dal TAF saranno inviate al serbatoio esistente TK-526 in prossimità del quale verranno posizionate anche le pompe di rilancio ai 48 pozzetti di re-immissione e/o allo scarico a mare.

La re-immissione risulta necessaria per evitare l'avanzamento del cuneo salino nel sottosuolo del sito della Raffineria; ciò, infatti, comprometterebbe il naturale equilibrio della falda con conseguenze dannose per l'approvvigionamento idrico della RAM. La barriera di re-immissione, collocata sul fronte mare e in prossimità della foce del Torrente Corriolo, ha quindi il triplice scopo di migliorare l'efficacia della barriera di emungimento, ridurre il carico inquinante in falda e limitare l'ingressione del cuneo salino.

Completa il Progetto MISO la costruzione di un sistema di interconnecting integrato all'esistente che consenta:

- Il convogliamento ai recapiti industriali, tramite la stazione di rilancio esistente, anche delle acque di falda emunte dai 4 nuovi pozzi;
- Il convogliamento al TAF, tramite stazione di rilancio, delle acque di falda emunte dai pozzi e dai due piezometri ad est del Torrente Corriolo;
- Lo scarico a mare e la re-immissione in falda, tramite stazioni di rilancio, delle acque trattate dal TAF.

I collettori saranno realizzati in acciaio al carbonio, come quelli del sistema esistente, e saranno posati fuori terra seguendo il percorso, dove disponibile, già presente; non è prevista la messa in opera di tratti interrati, a meno di alcuni punti in corrispondenza di attraversamenti stradali. La costruzione del nuovo sistema di interconnecting permette di avere la massima flessibilità di gestione potendo optare, per ogni singolo pozzo, se inviare la portata al pettine di smistamento e quindi ai recapiti industriali o alla stazione di rilancio e quindi al TAF. Il Progetto MISO sarà completato da due stazioni di rilancio acqua e un nuovo scarico a mare.

Riassumendo, quindi, il Progetto MISO prevede il completamento di un sistema in grado di emungere, collettare, trattare, inviare ai recapiti industriali e reimmettere/scaricare a mare le acque di falda. La distribuzione dei pozzi del sistema MISO è stata definita anche sulla base dei monitoraggi delle acque di falda emunte dal sistema MIS a Settembre 2011, Dicembre 2011, Marzo 2012 e

Luglio 2012, periodi di alto e basso piezometrico. In tal modo, con i pozzi del Progetto MISO che integreranno la rete MIS, si avrà un sistema di emungimento che si svilupperà per circa 1 000 m in tutta la fascia centrale della Raffineria parallela alla linea di costa.

In dettaglio, il Progetto MISO è stato elaborato mediante un modello matematico del flusso di falda costruito utilizzando i dati raccolti sia in fase di caratterizzazione idrogeologica del sito sia in fase di esercizio dei pozzi MIS e industriali. Ci si aspettava una sostanziale differenza nel comportamento della falda in condizioni di alto piezometrico (tra aprile e ottobre) e basso piezometrico (tra novembre e marzo). Infatti, per raggiungere il completo contenimento idraulico della falda, mediante il modello si è ottenuto che le portate da emungere tramite i pozzi MIS in condizioni di alto piezometrico possono essere più del doppio di quelle in basso piezometrico. Tale variazione, naturalmente, introduce un elemento di complessità sia in fase di progettazione sia in fase di esercizio, visti, soprattutto, i volumi d'acqua in gioco.

Per meglio trattare questo argomento, è risultato utile costruire uno schema a blocchi che, con un certo grado di dettaglio, illustrasse la gestione idrica dello stabilimento. Come riportato nelle Figure 2.10 e 2.11, per il sistema idrico della Raffineria di Milazzo sono stati considerati gli ingressi, le sezioni intermedie interessate dalla presente trattazione e le uscite. È stato necessario ripetere la schematizzazione per meglio rappresentare il sistema idrico nelle condizioni di alto e basso piezometrico, visto che tali condizioni, come detto precedentemente, presentano corpose differenze con riferimento ai valori delle portate in gioco.

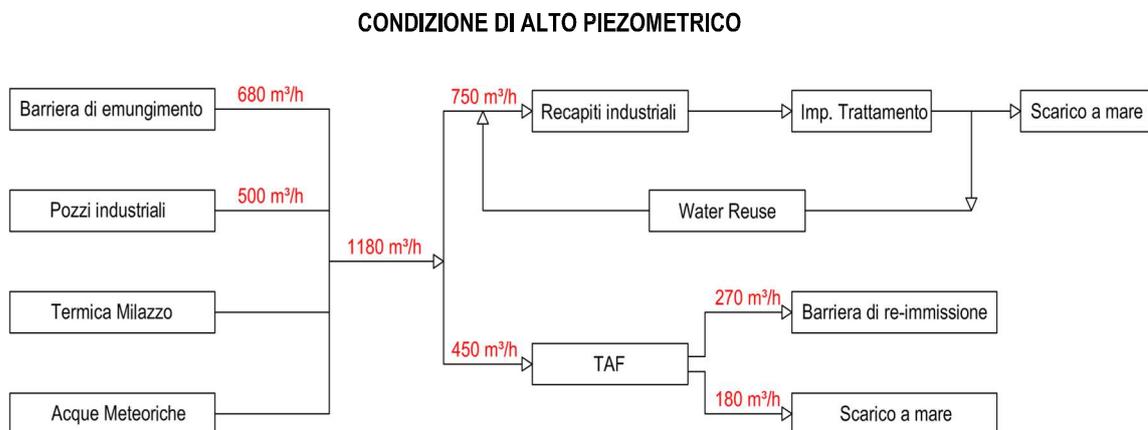


Figura 2.10 Schema a blocchi del progetto di gestione idrica della RAM in alto piezometrico

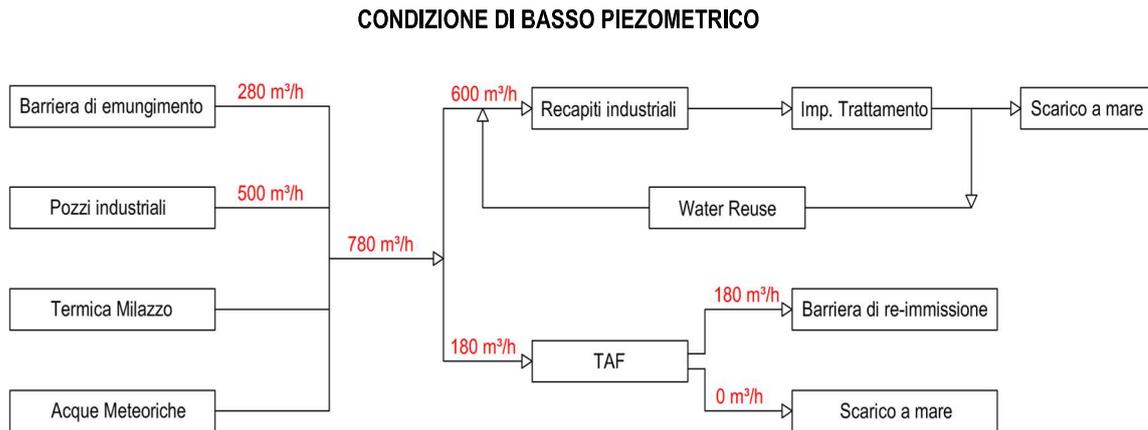


Figura 2.11 Schema a blocchi del progetto di gestione idrica della RAM in basso piezometrico

Dai volumi in m^3/h riportati negli schema a blocchi, emergono discrete differenze in condizioni di alto e basso piezometrico. Infatti, mentre la portata emunta con i pozzi industriali rimane uguale, non si può dire lo stesso per quella della barriera di emungimento che passa da $680 \text{ m}^3/\text{h}$ a $280 \text{ m}^3/\text{h}$. Ciò è dovuto al fatto che, in alto piezometrico, il volume di acqua presente in falda e di cui si vuole controllare la qualità è discretamente maggiore e quindi si rende necessario incrementarne l'emungimento. Altro valore discretamente diverso è il volume indicato come "recapiti industriali", che passa da $750 \text{ m}^3/\text{h}$ a $600 \text{ m}^3/\text{h}$. Infatti, pur rimanendo piuttosto costanti i consumi di acqua che interessano direttamente il processo produttivo e la produzione di vapore, così non è per altri usi accessori imputabili principalmente al reintegro del circuito cooling (volume circolante di $20\,000 \text{ m}^3/\text{h}$) e alla pressurizzazione della rete antincendio.

Il reintegro del circuito di raffreddamento è dipendente dalla stagionalità, in quanto nei mesi estivi le perdite per evaporazione dalle torri di raffreddamento si incrementano ed è necessario anche aumentare il blow down (spurgo) per mantenere sotto controllo i parametri chimici dell'acqua circolante. Complessivamente, l'incremento del reintegro di acqua dolce cambia da $70 \text{ m}^3/\text{h}$ a $100 \text{ m}^3/\text{h}$.

Un altro consumo che si incrementa nei mesi estivi è quello dovuto alla pressurizzazione della rete antincendio che, essendo molto estesa e utilizzata anche per fornire l'acqua nelle attività manutentive (bonifiche, lavaggi, presidio preventivo antincendio nei lavori con uso di fiamma libera), necessita mediamente di circa $60\text{-}80 \text{ m}^3/\text{h}$. Per la pressurizzazione della rete antincendio si cerca di massimizzare l'impiego di acqua depurata proveniente dall'impianto di trattamento delle acque reflue, mentre per la parte rimanente si provvede con

acqua dolce. Nei mesi invernali, quando in carica all'impianto di trattamento oltre alle acque reflue ci sono anche le acque meteoriche, l'acqua trattata qualitativamente è migliore e pertanto può soddisfare totalmente o quasi detto fabbisogno, mentre nei mesi estivi è necessario utilizzare diverse decine di m³/h di acqua proveniente dalla rete di pozzi per saturare il fabbisogno della rete antincendio.

Quanto sopra detto spiega le due maggiori cause che contribuiscono all'incremento del consumo di acqua dolce nei mesi estivi che, di fatto, coincidono con il periodo di alto piezometrico. Ciò sottolinea l'importanza di modulare opportunamente le portate di emungimento e ricavare le corrispondenti portate di re-immissione utili a contrastare l'avanzamento del cuneo salino.

Con particolare riferimento al sistema di barrieramento MISO, per determinare e certificare l'efficienza dell'impianto di re-immissione, in accordo con l'Art. 240 del D.Lgs 152/06, è necessario che, in caso di interventi di Messa in Sicurezza Operativa (MISO), siano *“predisposti idonei piani di monitoraggio e controllo che consentano di verificare l'efficacia delle soluzioni adottate”*. Nello specifico, si è previsto di eseguire attività per la verifica:

- Dello stato di integrità della pavimentazione nelle aree outdoor in corrispondenza delle aree RAM dove è stata rilevata contaminazione del suolo insaturo superficiale, in modo da monitorare l'efficacia delle azioni MISO finalizzate all'interruzione del percorso di esposizione per ingestione e/o contatto dermico (rischio sanitario);
- Delle concentrazioni dei contaminanti volatili nei soil-gas con campionamenti semestrali, al fine di monitorare l'effettiva assenza di condizioni di rischio a carico del percorso di esposizione per inalazione vapori (rischio sanitario);
- Dell'efficacia delle azioni MISO sulla falda, al fine di monitorare l'interruzione del percorso dei contaminanti lisciviati e trasportati in falda verso il recettore ambiente (rischio ambientale).

Quest'ultimo punto riveste particolare importanza poiché direttamente correlato con l'argomento in esame. Per l'interruzione del percorso di esposizione del recettore ambientale ad eventuali contaminanti, come detto precedentemente, la RAM darà attuazione alle Misure di Messa in Sicurezza Operativa. Considerati i tempi tecnici necessari per la realizzazione delle opere MISO, prima e durante la fase di costruzione, la RAM eseguirà il monitoraggio della falda ed utilizzerà i sistemi già attivati di messa in sicurezza. Pertanto, la RAM continuerà:

- Ad attuare una campagna di monitoraggio dei piezometri per valutare la qualità delle acque di falda su tutta l'area della Raffineria ed, in particolare, in corrispondenza delle aree dove sarà attuata la re-immissione;
- Ad utilizzare i pozzi MIS monitorando sia l'operatività dei sistemi di emungimento sia la qualità delle acque di falda emunte, per controllare il carico inquinante estratto e i profili di salinità.

Una volta terminata la realizzazione delle opere MISO, la RAM darà attuazione ad uno specifico protocollo per monitorare nel tempo l'efficacia del sistema. Naturalmente, al termine della fase di realizzazione sarà possibile iniziare la fase di acquisizione dei dati necessari alla validazione del sistema di contenimento idraulico, per verificare la correttezza delle ipotesi e la corrispondenza con i risultati attesi. In particolare, nei primi due anni di operatività del sistema MISO, la RAM attuerà un Protocollo di controllo che prevede:

- Verifiche impiantistiche per il monitoraggio dell'operatività dei sistemi in termini di capacità di emungimento, trattamento, re-immissione e/o collettamento;
- Verifiche idrauliche per il monitoraggio delle variazioni piezometriche indotte e la ricostruzione delle direzioni di deflusso della falda;
- Verifiche idro-chimiche per il monitoraggio delle concentrazioni dei contaminanti e dell'evoluzione dell'ingressione salina; si procederà anche all'esecuzione di campionamenti delle acque di falda e delle acque in uscita dall'impianto di trattamento dedicato (TAF).

Una volta calibrato il modello, saranno stabilite le condizioni operative di riferimento del sistema MISO. Per la realizzazione del MISO e delle relative attività di monitoraggio, considerando la parziale sovrapposibilità di alcune attività, è stato ipotizzato un termine di circa 3 anni calcolato a partire dall'emissione del Decreto di Autorizzazione del Progetto ai sensi del D. Lgs. n°152/06 completo di tutte le autorizzazioni ambientali necessarie per avviare i lavori.

La stima complessiva ($\pm 30\%$) dei costi del MISO è di 16 960 000 Euro.

2.4 Caratterizzazione idrogeologica del sito

Descritto il sistema idrico della Raffineria, si riportano di seguito gli elementi relativi alla caratterizzazione idrogeologica del sito e impiegati nello sviluppo del modello numerico utilizzato per i progetti MIS e MISO, commissionati da RAM

alla società *Wood Amec Foster Wheeler Italiana S.r.l. - Environmental Division*. Gli stessi elementi sono stati presi a riferimento anche per la costruzione del modello numerico elaborato nel presente lavoro di tesi al fine di studiare l'intrusione salina causata dall'emungimento e mitigata mediante il barrieramento.

La Raffineria di Milazzo, come detto precedentemente, sorge sulla costa settentrionale della Sicilia nei comuni di San Filippo del Mela e Milazzo con un'estensione di circa 212 ettari, in corrispondenza dei bacini idrici dei Torrenti Corriolo – Floripotema e Mela. Il sito a nord è prospiciente al Golfo di Milazzo, a sud è racchiuso da una cintura gradatamente collinare con un'ampiezza di circa 15 km che si collega alla catena dei Monti Peloritani caratterizzati da un'altitudine massima di 1 300 m s.l.m.; tale catena può considerarsi una naturale prosecuzione dell'Appennino Calabro. L'area su cui la RAM insiste, denominata "Piana di Milazzo", presenta una leggera e costante pendenza decrescente verso nord, ha un'ampiezza variabile compresa tra 2 e 6 km ed ospita la maggior parte delle zone urbanizzate del comprensorio. Nel settore occupato dagli impianti e dalle unità di stoccaggio della Raffineria la quota del piano campagna varia tra 1,00 – 1,50 m s.l.m. in prossimità della linea di costa e tra 25 – 30 m s.l.m. nella parte più a sud.

Nella Figura 2.12 è riportata una ricostruzione della morfologia del piano campagna del sito di interesse per una più chiara e immediata rappresentazione.

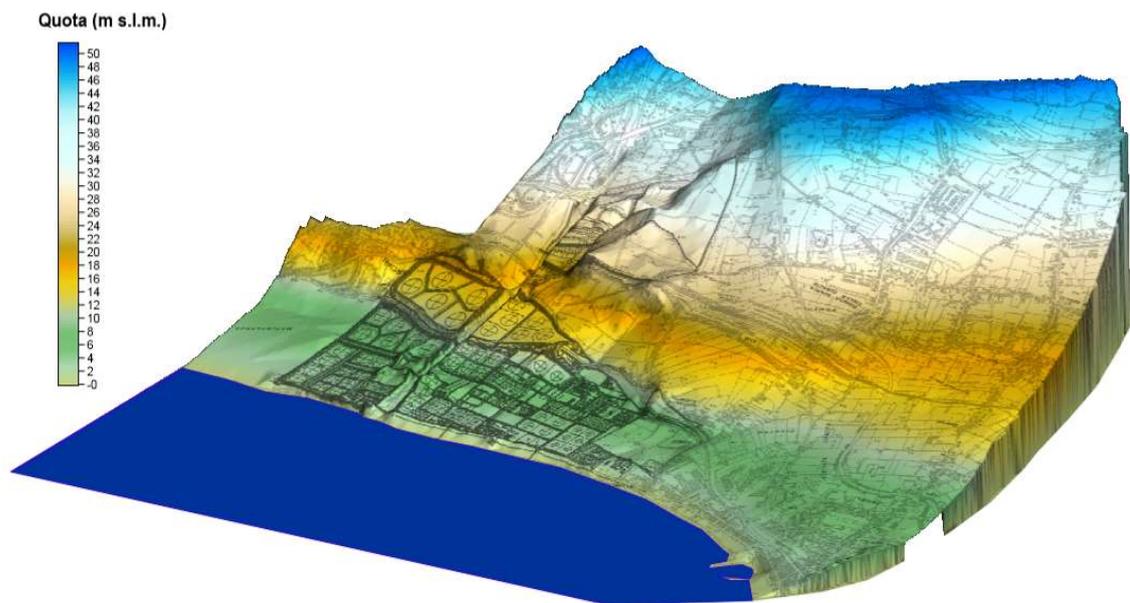


Figura 2.12 Ricostruzione morfologica del piano campagna nell'area della Raffineria e nel comprensorio (Archivio RAM)

2.4.1 Assetto geologico e litostratigrafico

La sequenza sedimentaria rintracciabile nell'area della Piana di Milazzo descrive le fasi deposizionali dal tardo Miocene all'attuale. Il substrato è costituito da un basamento cristallino di micascisti e gneiss del Complesso Calabriano ricoperto da formazioni flyschoidi oligoceniche e mioceniche. Il tardo Miocene è rappresentato da sedimenti marini arenacei e siltitici sopra cui si rinvengono marne e marne argillose. La sequenza è chiusa da sedimenti marini postorogenetici pliocenici e pleistocenici e da depositi alluvionali recenti. Quanto sopra detto è schematizzato nella Figura 2.13.

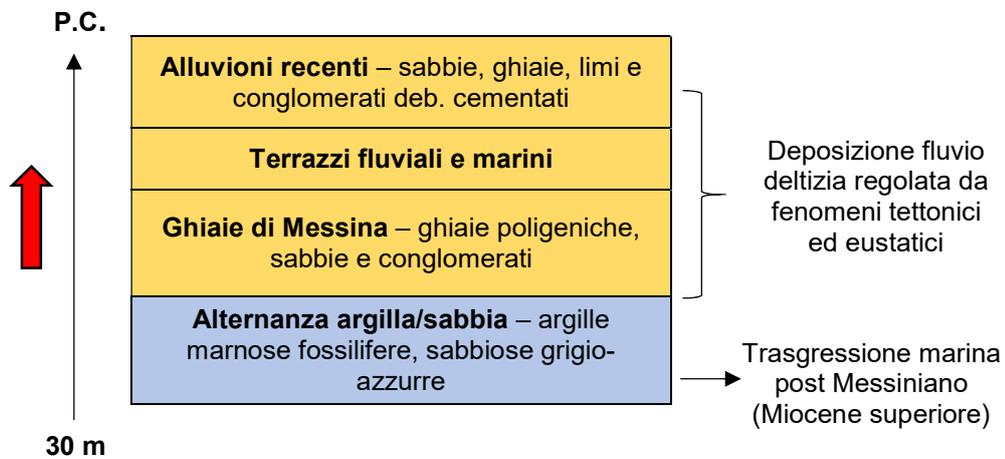


Figura 2.13 Sequenza sedimentaria della Piana di Milazzo su cui sorge la Raffineria

L'area analizzata risulta inoltre interessata da numerose faglie di periodo diverso aventi direzione prevalente NO-SE o NE-SO, come mostrato nella Figura 2.14.

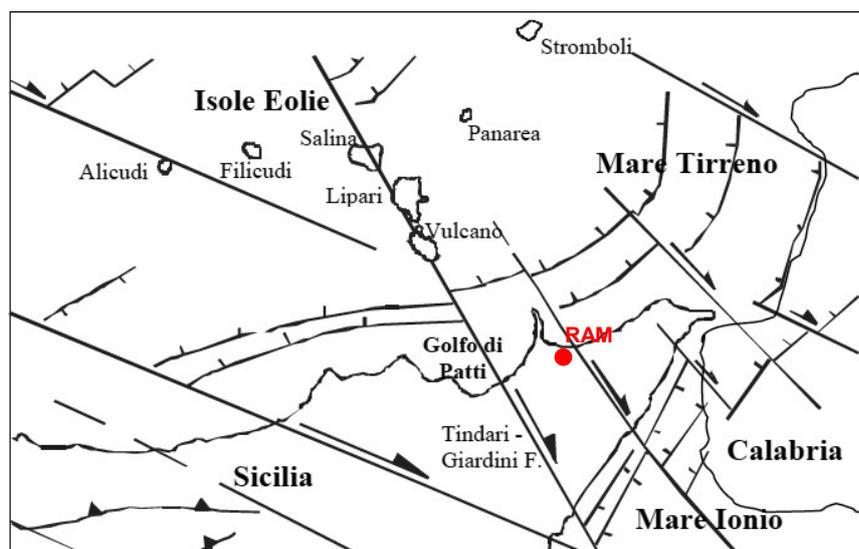


Figura 2.14 Mappa schematica del sistema di faglie Arco Calabro-Peloritano – Tirreno Meridionale (Finetti e Del Ben, 1986)

Nella Figura 2.15 si riporta invece uno stralcio della carta geologica relativo al comprensorio della Raffineria. Dal mare fino alle prime alture il sottosuolo è caratterizzato da sedimenti alluvionali sabbiosi e ghiaiosi; ad essi si sostituiscono poi sabbie argillose e conglomerati e, più a sud, calcari e gessi.

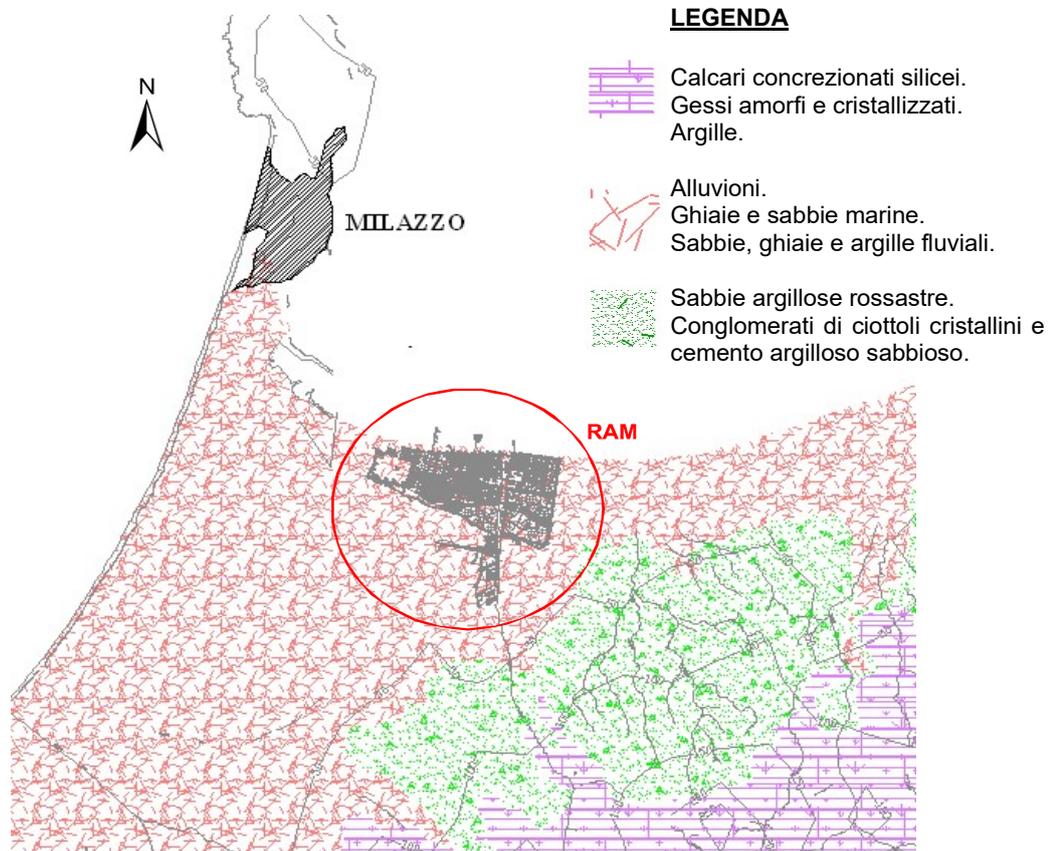


Figura 2.15 Stralcio della carta geologica relativo al sito della Raffineria (Archivio RAM)

Nell'Allegato 2 si riportano otto sezioni idrogeologiche sviluppate da *Ecotherm S.p.A.* nel 1992, nell'Allegato 3 tre sezioni idrogeologiche ricostruite sulla base di rilievi più recenti (2010), negli Allegati 4 e 5 due sezioni idrogeologiche elaborate lungo la linea dei 15 pozzi industriali. Dagli allegati si evince che, in linea generale, tutta l'area di competenza della Raffineria dal p.c. fino a 10-14 m di profondità è caratterizzata da sabbie a granulometria medio-fine e/o grossolane, con presenza di ghiaie e ciottoli; si evidenziano inoltre strati di limi, limi sabbiosi e sabbie limose. In corrispondenza dei pozzi 6, 10, 18, 20, 21 e 24 si rileva la presenza di conglomerati. Dalle stratigrafie dei pozzi industriali e dai piezometri profondi realizzati si riscontra la presenza di una formazione argillosa compatta di colore grigio-giallastro, a volte tendente al grigio-verdastro, che confina inferiormente l'acquifero principale e che è rinvenibile ad una profondità variabile tra 30 e 50 m dal piano campagna.

Significativa è la variazione di profondità a cui si riscontra tale orizzonte argilloso: verso la costa, infatti, le argille si rilevano ad una profondità intorno ai 23-28 m da p.c. mentre spostandosi verso l'entroterra l'orizzonte argilloso è ancora più profondo e comincia a comparire prima intorno ai 30 m da p.c. e poi, più a sud, intorno ai 38-45 m da p.c., anche a seguito della variazione di quota del piano campagna. Sotto la formazione argillosa si riscontra una successione stratigrafica data dalla continua alternanza di litotipi grossolani e medio-grossolani (sabbie e ghiaie) di spessore variabile tra 10-15 metri e 25-30 metri, con livelli impermeabili di argille.

2.4.2 Caratterizzazione idrica del sito

Descritto l'assetto geologico e litostratigrafico del sito in cui la Raffineria di Milazzo sorge, si procede all'esposizione delle caratteristiche idrografiche e idrogeologiche. L'area di interesse è caratterizzata dalla presenza di "fiumare", corsi d'acqua con carattere torrentizio i cui letti, orientati prevalentemente secondo un asse N-S, hanno origine dalla catena dei Monti Peloritani e si dirigono verso il Mar Tirreno. In particolare, in prossimità del sito di pertinenza della RAM, si rintracciano due bacini di maggiore rilevanza: il bacino del Torrente Corriolo – Floripotema (con una superficie di 35,39 km²) e quello del Torrente Mela (con una superficie di 81,18 km²). Nella Figura 2.16 sono riportati i limiti dei bacini ed i rispettivi corsi d'acqua con riferimento alle quote.

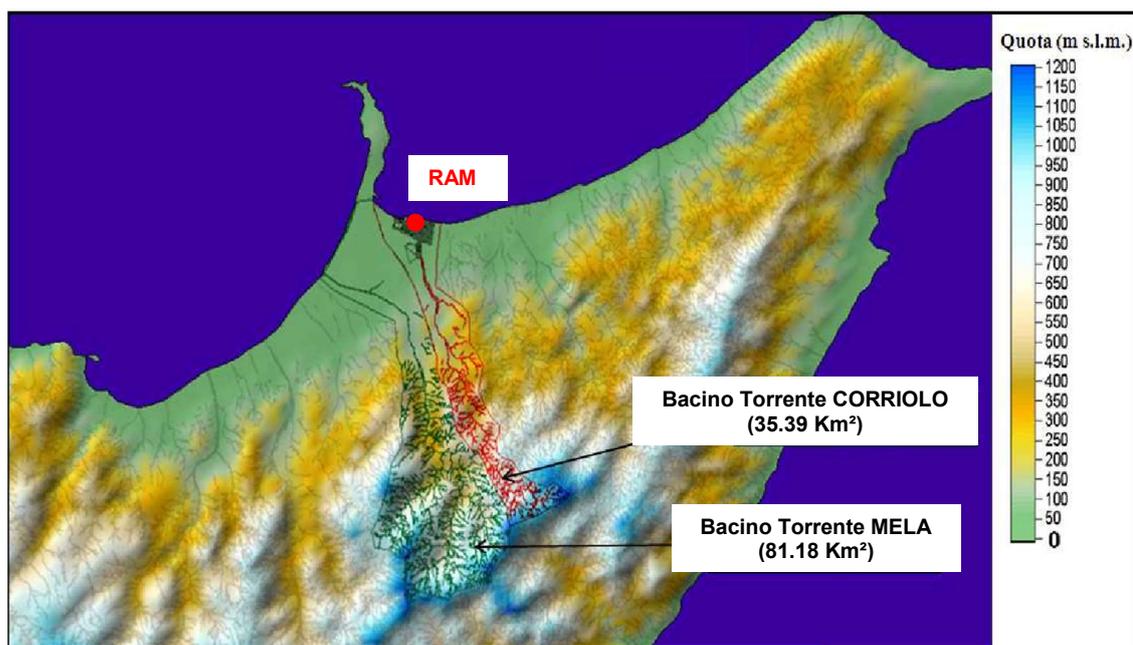


Figura 2.16 Rappresentazione delle quote dei Bacini del Corriolo e del Mela (Archivio RAM)

È facile intuire che i due bacini idrografici hanno una conformazione tale per cui le acque meteoriche sono convogliate ai depositi alluvionali costieri con dinamiche che determinano significative variazioni (stagionali/annuali) del livello di falda nell'acquifero freatico. In particolare, il Torrente Corriolo nasce dal Pizzo della Croce e dal Monte Lovarello, forma un'ampia conoide che degrada progressivamente verso il mare occupando i depositi fluvio-alluvionali adiacenti e interessando l'area di competenza della RAM con quote idriche che variano tra 28 e 0 m s.l.m. Il Torrente Corriolo è periodicamente soggetto a prosciugamento (completo o parziale) ed è caratterizzato da un battente idraulico generalmente modesto (dell'ordine di 0,3 m per una larghezza della vena d'acqua di 2-3 m) presente in concomitanza dei periodi più piovosi (autunno e inverno). Il battente idraulico risulta comunque variabile in funzione dell'entità delle precipitazioni meteoriche; infatti, in seguito a precipitazioni di forte intensità, si verificano piene piuttosto violente a causa delle pendenze non trascurabili del bacino. Durante la stagione primaverile ed estiva il flusso permane e continua ad alimentare la falda anche dopo i periodi più piovosi grazie all'immagazzinamento temporaneo delle acque svolto dai terreni che costituiscono il bacino.

Ai fini della ricostruzione della morfologia del substrato a bassa permeabilità (argille), base dell'acquifero freatico superficiale nell'area su cui sorge la Raffineria, si è fatto riferimento ai dati stratigrafici riportati nel paragrafo 2.4.1 e a tre sondaggi effettuati precedentemente al 2010 reperiti nell'Archivio Nazionale delle Indagini del Sottosuolo ISPRA (codici 172642, 172576, 172586).

Nella Figura 2.17 si illustra la ricostruzione della morfologia del substrato a bassa permeabilità (quote espresse in m s.l.m.) da cui si evince che le profondità maggiori si evidenziano nell'area centro-sud della Raffineria e a est del Torrente Corriolo. In particolare, in corrispondenza del piezometro FWPZ275 (profondità di 45 m da p.c.) ubicato a est del torrente in prossimità del serbatoio Tk 500 (indicato nella Figura 2.17), il substrato argilloso non è stato intercettato; in tale zona la profondità del substrato è stata assunta a circa 48 m da p.c. Immediatamente ad est del piezometro si riscontra una riduzione della quota del substrato argilloso a causa della probabile presenza di una faglia. Tale evidenza è supportata dai sondaggi S31 ed S11 tramite cui è stato intercettato uno strato a bassa permeabilità ad una quota significativamente superiore rispetto agli altri punti di indagine profondi posti alla medesima distanza dalla linea di costa. Data la scarsità di informazioni litostratigrafiche in tale zona, la morfologia del substrato è stata interpretata ai fini della costruzione del modello idraulico.

L'analisi stratigrafica ha inoltre evidenziato la presenza di un unico acquifero freatico (falda superficiale) che, nella parte centrale del sito, risulta semiconfinato da un livello a bassa permeabilità di spessore modesto. L'acquifero ha sede in materiali medio-grossolani alternati a materiali medio-fini, tutti sostenuti dallo strato inferiore di argilla compatta. La morfologia della base dell'acquifero principale si presenta irregolare anche per l'azione dei fenomeni erosivi dovuti alla presenza del Torrente Corriolo; ciò comporta una certa variabilità nello spessore anche entro settori di estensione relativamente limitata.

In corrispondenza delle aree indagate, le informazioni raccolte rivelano uno spessore minimo dell'acquifero pari a pochi metri nel settore est della Raffineria, mentre gli spessori maggiori (35 m circa) sono presenti in corrispondenza del Torrente Corriolo. Immediatamente a sud-ovest dello stabilimento, l'acquifero freatico raggiunge uno spessore di circa 100 m con quote stimate della base approssimativamente pari a - 85 m s.l.m.; l'estensione di tale zona, in superficie, risulta incerta ma potrebbe essere riconducibile ad un paleo-alveo del Torrente del Mela. Gli acquiferi inferiori, invece, risultano confinati e contengono falde in pressione. Il primo di un certo rilievo è posto a profondità variabili tra 115 e 173 m da p.c. ed è separato da quello superficiale da uno spessore prossimo a 100 m di marne e marne argillose. Sulla base dei dati disponibili, si segnala che gli acquiferi confinati presentano un alto tenore salino e pertanto le loro acque non sono utilizzabili.

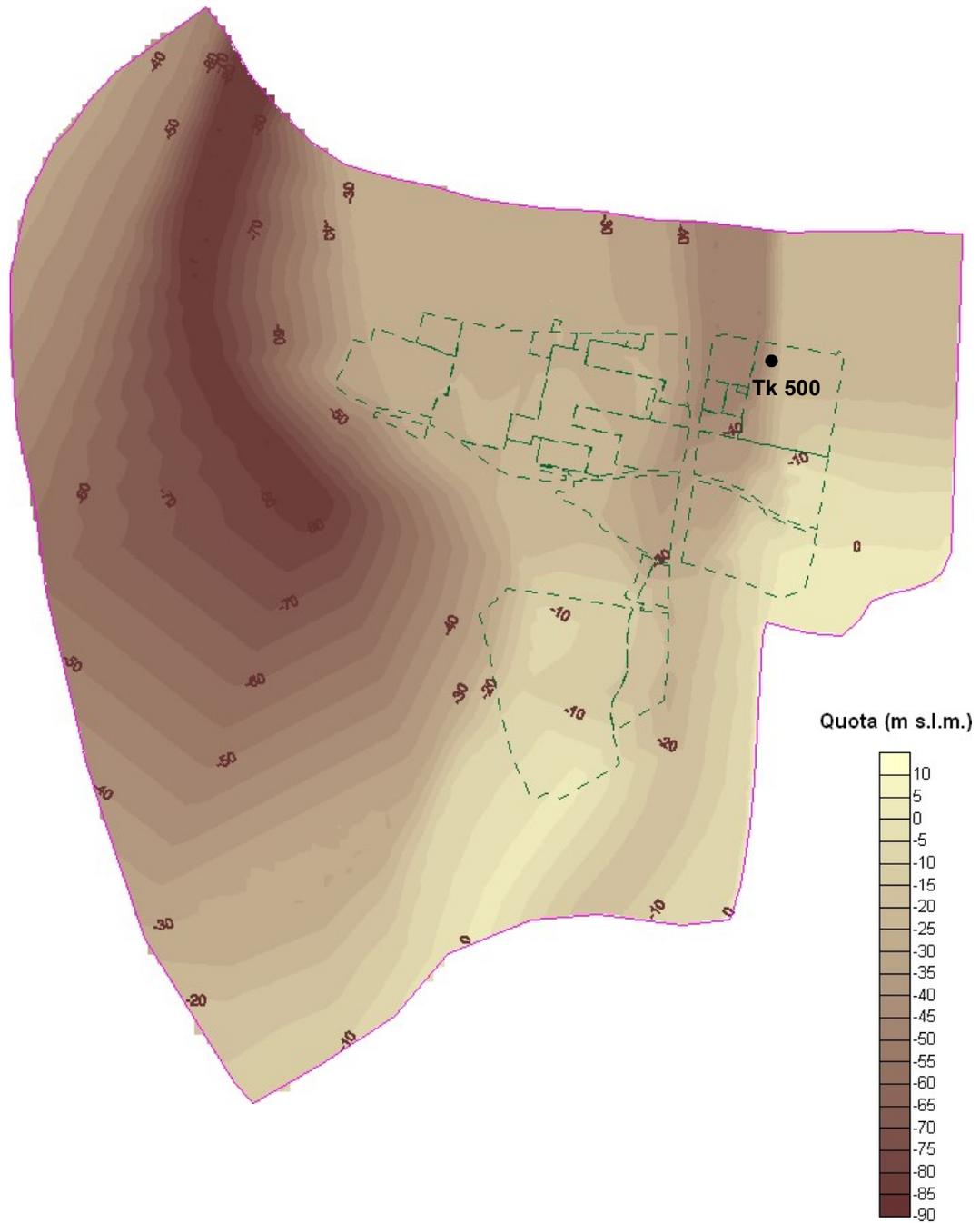


Figura 2.17 Andamento del tetto del primo livello a bassa permeabilità in corrispondenza della Raffineria (perimetro tratteggiato in verde) e del comprensorio (Archivio RAM)

Sintesi

Il Capitolo 2 è stato dedicato allo studio del fenomeno dell'intrusione salina e alla presentazione della Raffineria di Milazzo, per descrivere e caratterizzare il contesto all'interno del quale è stata condotta l'analisi dell'avanzamento del cuneo salino.

Come spiegato in dettaglio nei paragrafi 2.1 e 2.2, sorgendo in prossimità della costa ed essendo soggetto ad una consistente attività di emungimento dalla falda, il sito della Raffineria di Milazzo risulta inevitabilmente interessato dal fenomeno dell'intrusione salina. Il prelievo d'acqua, infatti, causa la depressione dell'acquifero e richiama l'acqua salata dal mare verso l'entroterra, con conseguenze dannose sia ambientali che industriali.

Nel paragrafo 2.3 sono state riportate le informazioni relative alla storia, all'organizzazione e alla logistica della RAM, con particolare riferimento agli impianti e ai prodotti dell'opificio. Riassumendo quanto detto, si evince che quella di Milazzo è tra le raffinerie più complesse e complete d'Europa, lavorando circa 10 milioni di tonnellate di petrolio greggio all'anno con impianti e tecnologie che consentono una conversione spinta. I prodotti sono ottenuti nel rispetto dei criteri di sicurezza e sostenibilità e risultano in linea con le più stringenti specifiche di qualità.

Nel paragrafo 2.4 è stata descritta dettagliatamente la gestione idrica della Raffineria, riportando le fonti di approvvigionamento, i recapiti e gli impianti di trattamento delle acque reflue. Considerate le dimensioni e l'entità produttiva dei processi industriali, emerge che il fabbisogno idrico è dell'ordine del migliaio di m³/h e circa l'80 % deriva dall'emungimento dalla falda tramite pozzi. Nell'ultimo ventennio, la gestione idrica della Raffineria, con particolare riferimento all'attività di emungimento, ha subito corpose modifiche e ottimizzazioni culminate con la realizzazione dei Progetti di Messa in Sicurezza della falda (MIS) e di Messa in Sicurezza Operativa (MISO). Tali opere hanno come obiettivo il controllo della qualità dell'acqua di falda e la mitigazione del fenomeno dell'intrusione salina, al fine di garantire l'emungimento necessario senza rischi ambientali e danni industriali.

Nel paragrafo 2.5 è stata presentata la caratterizzazione idrogeologica del sito che è costituito da un'alternanza di strati di spessore variabile di sabbia ghiaiosa e di limi con lenti d'argilla. Inoltre, l'analisi stratigrafica ha evidenziato la presenza di un unico acquifero freatico semiconfinato inferiormente da un livello d'argilla

ad una profondità media di 30 m dal piano campagna. Gli acquiferi inferiori, invece, risultano confinati e contengono falde in pressione; il primo di questi di un certo rilievo è posto a profondità variabili tra 115 e 173 m dal piano campagna.

3 DESCRIZIONE DEL METODO AGLI ELEMENTI FINITI E DEL CODICE DI CALCOLO FEFLOW

Premessa

In questo capitolo si descrivono il metodo agli elementi finiti e il software FEFLOW, codice di calcolo con cui è stato realizzato il modello matematico di flusso e trasporto in falda per lo studio dell'avanzamento del cuneo salino. Infatti, nel campo dell'idrogeologia i codici di calcolo numerico sono molto diffusi per analizzare il comportamento degli acquiferi e per individuare le possibili soluzioni alle problematiche ambientali, anche in presenza di particolari elementi di disturbo.

Poiché i fenomeni reali possono essere rappresentati mediante equazioni complesse ma di difficile soluzione analitica, nell'ambito dell'ingegneria si ricorre spesso all'uso di metodi numerici. Tali metodi oggi sono molto diffusi e applicati con una certa sistematicità grazie allo sviluppo spinto dei software e dei mezzi informatici. In particolare, in campo geotecnico, queste metodologie risultano indispensabili per tenere conto dell'elevato numero di parametri che intervengono nello studio del sottosuolo e del loro grado di incertezza. Il sistema suolo e/o sottosuolo approcciato in ambito ingegneristico, infatti, è caratterizzato da numerosi parametri estremamente variabili e pertanto di difficile determinazione.

Per questo motivo, la fase di indagine e raccolta dati propedeutica all'esecuzione di ogni analisi numerica deve essere condotta in modo mirato e scrupoloso, al fine di individuare i parametri rappresentativi effettivamente utili alla costruzione del modello e aventi il maggior grado di attendibilità. Infatti, i modelli numerici risultano estremamente sensibili ai dati di input, motivo per cui è necessario valutare criticamente i risultati ottenuti al fine di verificare la congruenza dell'ambiente di calcolo con la realtà. Nei casi di non congruenza, per ottenerla,

si rende necessario modificare i parametri iniziali e le assunzioni fatte. Quindi, nonostante la potenza e l'efficacia, l'analisi numerica rimane comunque uno strumento da utilizzare con un approccio critico e supportato da una buona dose di esperienza.

3.1 Introduzione all'analisi numerica e al software FEFLOW

L'analisi dell'avanzamento del cuneo salino è stata condotta utilizzando il codice di calcolo agli elementi finiti FEFLOW 7.202 (DHI-WASY GmbH) che permette la modellazione numerica tridimensionale del flusso e del trasporto in falda in condizioni "densità dipendenti". L'utilizzo del software non può prescindere da una puntuale e dettagliata conoscenza del metodo numerico agli elementi finiti su cui si fondano i suoi algoritmi. Il metodo agli elementi finiti (FEM, Finite Element Method) è una tecnica numerica capace di trovare soluzioni approssimate allo studio di fenomeni rappresentati da equazioni differenziali alle derivate parziali, poi ridotte a un sistema di equazioni algebriche.

La realtà che ci circonda, infatti, è generalmente governata da equazioni differenziali alle derivate parziali (quasi sempre non lineari) estremamente difficili da risolvere in termini matematici; solo per casi semplici è possibile ottenere soluzioni analitiche. Invece, per i problemi fisici reali caratterizzati da complesse proprietà dei materiali e articolate condizioni iniziali e al contorno, è preferibile utilizzare l'analisi numerica, introducendo ipotesi semplificative per rendere i sistemi matematicamente più semplici ma capaci di fornire soluzioni sufficientemente attendibili e soddisfacenti, anche se approssimate. In tal caso, il legame tra il sistema reale e la soluzione matematica è rappresentato da un modello matematico che approssima il sistema reale, da intendersi come una rappresentazione schematica della realtà. La costruzione di tale modello è probabilmente la fase più complessa di un'analisi numerica: esso deve contenere tutte le informazioni che caratterizzano lo scenario che si vuole studiare e che, ovviamente, influenzeranno i risultati finali.

La soluzione delle equazioni rappresentanti il modello matematico può essere determinata mediante diversi metodi di analisi numerica, tra cui, appunto, il metodo agli elementi finiti alla base del funzionamento del software FEFLOW utilizzato nel lavoro di tesi. Cronologicamente, però, la prima metodologia di analisi numerica sviluppata è stata quella alle differenze finite (FDM, Finite Difference Method). Tale approccio mantiene "inalterato" il modello fisico e discretizza le equazioni differenziali fornendo soluzioni in via approssimata.

L'approssimazione consiste nell'assimilare la derivata di una generica funzione f al suo rapporto incrementale:

$$\frac{\partial f}{\partial x} \equiv \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta f}{\Delta x} \cong \frac{\Delta f}{\Delta x}$$

Se Δx è piccolo ed f varia con regolarità, l'errore che si commette nell'approssimazione è trascurabile, soprattutto in ambito ingegneristico; nel metodo delle differenze finite, dunque, tanto più fine è la discretizzazione operata, tanto più il risultato ottenuto sarà vicino alla soluzione "vera". Tale algoritmo permette di trattare problemi anche molto complessi ma nel caso di geometrie irregolari o particolari condizioni al contorno si rivela inapplicabile. Per questo motivo, l'FDM è stato successivamente affiancato dal metodo agli elementi finiti (FEM).

Il FEM è nato in sordina negli anni '60 ma solo dopo lo sviluppo dell'informatica ha avuto una evoluzione esponenziale, per i numerosi settori in cui è stato possibile applicarne i principi. Originariamente utilizzato per studiare il campo tensionale nelle strutture aeronautiche, il FEM è stato infatti esteso poi al vasto campo della meccanica dei continui, vista la possibilità di applicazione senza eguali grazie all'estrema flessibilità del metodo.

3.2 Descrizione del metodo agli elementi finiti

Per lo studio di un particolare fenomeno che ha luogo in un corpo o in una regione dello spazio (dominio), la variabile di campo che lo caratterizza (pressione, spostamento, temperatura, velocità o densità) è funzione di ciascun punto del dominio stesso e il sistema di equazioni che lo rappresenta avrebbe un numero infinito di incognite. L'uso del metodo agli elementi finiti, invece, è capace di rendere finito il numero di incognite attraverso una procedura di discretizzazione che consiste nel suddividere il dominio di calcolo in elementi finiti (sottodomini di forma elementare), in modo che la variabile di campo incognita risulti espressa in termini di funzioni approssimanti definite all'interno di ogni elemento.

Il metodo agli elementi finiti, quindi, parte dalla discretizzazione del continuo attribuendo ad esso solo un numero finito di gradi di libertà (in termini di spostamento ad esempio) e successivamente impone le leggi di conservazione e di comportamento; di conseguenza, le equazioni algebriche che ne derivano risultano "naturalmente" discretizzate. Per illustrare il metodo FEM si consideri la superficie rappresentata dalla funzione $u(x,y)$ nella Figura 3.1 come soluzione

incognita di un problema differenziale del secondo ordine definito all'interno del dominio rettangolare di vertici OABC. Tale dominio può essere idealmente suddiviso in porzioni più piccole denominate, appunto, elementi finiti, i cui vertici prendono il nome di nodi. L'insieme degli elementi e dei nodi viene definito *mesh*. In linea di principio, la forma degli elementi dovrà essere semplice (triangolare o rettangolare) allo scopo di approssimare agevolmente i domini irregolari.

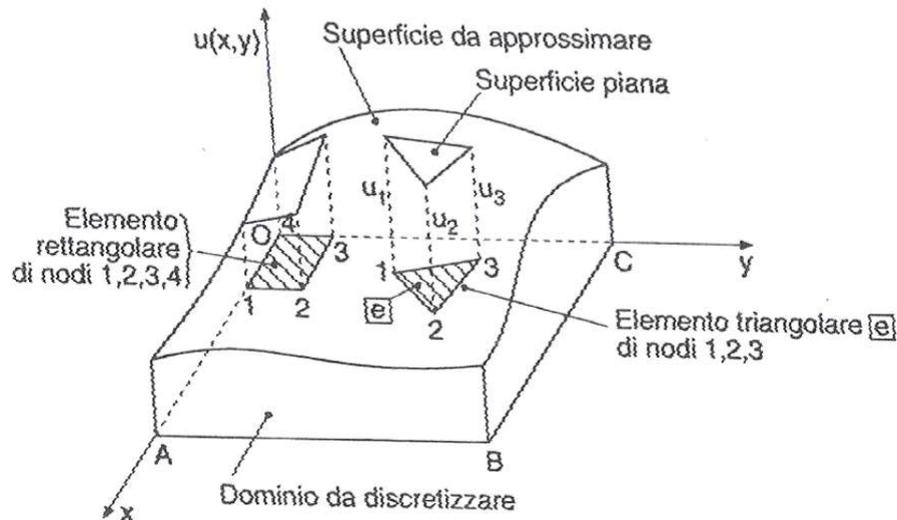


Figura 3.1 Approssimazione della funzione $u(x,y)$ e discretizzazione con elementi di varia forma

Nel caso di discretizzazione con elementi triangolari, per ogni elemento e si può rappresentare la funzione $u(x,y)$ mediante un polinomio lineare in x e in y avente tre termini quanti sono i nodi del triangolo:

$$u_e(x, y) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y$$

Nel caso di discretizzazione rettangolare, il polinomio approssimante la funzione incognita avrà tanti termini quanti sono i nodi del rettangolo:

$$u_e(x, y) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 xy$$

Utilizzando ad esempio una discretizzazione triangolare, i valori u_1, u_2, u_3 della funzione $u(x,y)$ in corrispondenza dei tre nodi del generico elemento e rappresentano i parametri nodali e costituiscono le incognite del problema. Una volta discretizzato il dominio di calcolo, occorre definire l'andamento della funzione $u(x,y)$ all'interno di ogni singolo elemento, determinando in tal modo le proprietà del dominio discretizzato con cui è stato approssimato il sistema originario. Pertanto, è necessario assumere un modello che permetta di definire la funzione $[u(x,y)]$ in ogni punto all'interno del generico elemento in funzione dei valori nodali incogniti $[u]_e$, secondo la seguente espressione:

$$[u(x, y)] = [H(x, y)]^T [u]_e$$

con $[H(x, y)]$ matrice delle funzioni di forma. Le funzioni di forma H_i si ricavano imponendo al modello lineare di assumere i valori u_i in corrispondenza delle coordinate x_i, y_i relative ai nodi.

L'idea base usata nel FEM, quindi, è quella di approssimare il vero andamento della funzione incognita con quello di alcune funzioni particolari ad andamento noto, generalmente polinomiali ma anche trigonometriche ed esponenziali. Naturalmente, l'ordine del polinomio utilizzato influenza la precisione della soluzione delle equazioni differenziali: più è elevato il grado, migliore sarà l'approssimazione. Oltre che dal grado del polinomio utilizzato, la precisione dell'approssimazione dipende anche dalla dimensione dell'intervallo di suddivisione: considerando ad esempio un polinomio lineare, l'errore si riduce proporzionalmente al ravvicinamento dei nodi e quindi alla riduzione degli intervalli. Nel caso la funzione da approssimare presenti forti gradienti, risulta utile infittire i nodi solo in queste zone piuttosto che in tutto il dominio di calcolo; tale flessibilità è tra le più importanti caratteristiche di applicazione del FEM.

È importante sottolineare che la richiesta di maggiore precisione della soluzione è pagata in termini di tempi computazionali e disponibilità di memoria per l'immagazzinamento dei dati di input e di output. Definito il comportamento di ogni elemento, si può caratterizzare quello dell'intero problema ripristinando la continuità della struttura.

L'algoritmo FEM prevede l'utilizzo di equazioni di equilibrio, di equazioni di compatibilità, di equazioni costitutive e delle condizioni al contorno. Sinteticamente si elencano di seguito gli step necessari per la costruzione e la risoluzione di un modello con il Metodo degli Elementi Finiti.

1. *Definizione della regione di calcolo*

Individuazione dello spazio in cui ha luogo il fenomeno da studiare.

2. *Discretizzazione del dominio di calcolo*

Suddivisione della regione di calcolo in piccole porzioni di varie forme e dimensioni chiamate Elementi Finiti.

3. *Approssimazione della variabile primaria*

Determinazione della variabile primaria caratterizzante il fenomeno e della sua variazione all'interno degli elementi finiti. Nell'ingegneria geotecnica, solitamente, come variabile primaria è individuata lo spostamento. La

variazione della variabile spostamento all'interno degli elementi può essere espressa in funzione della geometria dell'elemento e degli spostamenti nodali incogniti $[u]_e$:

$$[u(x, y, z)] = [H(x, y, z)]^T [u]_e$$

con $[H(x, y, z)]$ funzione di forma.

4. Determinazione delle equazioni degli elementi

La combinazione delle equazioni di compatibilità, di equilibrio e costitutive definisce il comportamento deformativo di ciascun elemento. Usando gli spostamenti nodali $[u]_e$, le componenti di deformazione $[\varepsilon]$ possono essere rappresentate mediante la matrice di deformazione dell'elemento $[B]$ che contiene le derivate della matrice di forma $[H]$:

$$[\varepsilon] = [B][u]_e$$

Conoscendo le deformazioni $[\varepsilon]$ e assumendo ad esempio un comportamento lineare del sistema, tramite le equazioni costitutive è possibile ottenere il campo deformativo $[\sigma]$:

$$[\sigma] = [C][\varepsilon]$$

essendo $[C]$ la matrice di elasticità. In tal modo, a partire dalla conoscenza della geometria del sistema e degli spostamenti nodali, è possibile ricostruire il campo tenso-deformativo di ciascun elemento. Sfruttando il principio dei lavori virtuali e considerando un volumetto infinitesimo V_e , si ottiene la matrice di rigidezza $[K_e]$ per ciascun elemento:

$$[K]_e = \int_{V_e} [B]_e^T [C]_e [B]_e dV_e$$

Per ciascun elemento è quindi possibile ottenere le reazioni $[X]_e$ in prossimità di ciascun nodo:

$$[X]_e = [K]_e [u]_e$$

5. Determinazione delle equazioni globali

L'assemblaggio delle equazioni di equilibrio di ogni elemento ripristina la continuità del sistema. Combinando le matrici di rigidezza di ogni elemento si ha la matrice espansa $[K]_g$ della rigidezza del sistema globale. In tal modo, è possibile calcolare le reazioni esterne $[X]_g$ facendo riferimento ai valori degli spostamenti nodali $[u]$, parametri, se non imposti, ancora incogniti:

$$[X]_g = [K]_g[u]$$

6. *Introduzione delle condizioni al contorno*

Le condizioni al contorno sono associate alle equazioni globali e risultano fondamentali per la loro risoluzione, in quanto le variabili incognite (in termini di spostamenti nodali e reazioni esterne) sono maggiori, per numero, delle equazioni risolutive a disposizione.

7. *Risoluzione delle equazioni globali*

Una volta risolte le equazioni globali e ricavate definitivamente le forze esterne e gli spostamenti, è possibile ottenere le tensioni e le deformazioni, ricostruendo così il campo tenso-deformativo dell'intero modello.

3.3 Equazioni risolutive e algoritmi di calcolo del software FEFLOW

Descritto il metodo agli elementi finiti, di seguito si trattano le equazioni fondamentali alla base dell'algoritmo del software FEFLOW per la simulazione del flusso e del trasporto di massa negli acquiferi.

Tutti i modelli numerici idrogeologici, dai più semplici ai più complessi, si basano sulla risoluzione del sistema delle equazioni differenziali del moto del flusso e del trasporto che rappresentano, sotto forma matematica, il comportamento del sistema reale. La soluzione di queste equazioni consente di individuare la distribuzione della funzione incognita (altezza piezometrica o concentrazione) nello spazio e nel tempo.

3.3.1 Equazione del moto del flusso

L'equazione del moto del flusso descrive il movimento di un fluido in un mezzo poroso (terreno permeabile per porosità) ed in particolare, per mezzi porosi non saturi o a saturazione variabile, è rappresentata dalla *Legge di Richards*, trattazione che si basa anche sulla *Legge di conservazione della massa* (la somma della massa entrante e uscente deve essere uguale alla variazione di massa all'interno di un volume elementare).

Essendo ρ la densità dell'acqua, θ_w il contenuto d'acqua, v_i con $i = x, y, z$ il campo di velocità del flusso, si riporta l'espressione generale dell'*Equazione di flusso di Richards*:

$$\frac{\partial(\rho\theta_w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = \pm W$$

È possibile scomporre l'espressione sopra riportata in tre differenti termini.

- Il termine $\frac{\partial(\rho\theta_w)}{\partial t}$ rappresenta la variazione di massa nel tempo che può essere dovuta alla variazione:
 - Del grado di saturazione del mezzo (terreno non saturo);
 - Della porosità in funzione della pressione (deformazione e/o consolidazione in terreno saturo);
 - Della densità del fluido in funzione della temperatura e della concentrazione delle sostanze disciolte.
- Il termine W è un termine generativo che considera la presenza di pozzi (riduzione della massa) o sorgenti/ricariche (aumento della massa) nel dominio studiato.
- Il termine $\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z}$ rappresenta il flusso di massa il cui campo di velocità v_i è regolato dalla *Legge di Darcy*:

$$v_i = -K_i \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad (x_i = x, y, z)$$

Nell'espressione sopra riportata K_i è il tensore del secondo ordine della conducibilità idraulica e h è il carico idraulico (somma del contributo geometrico e dell'aliquota di pressione del fluido).

La conducibilità idraulica K è un parametro di fondamentale importanza che indica l'attitudine di un terreno a farsi attraversare da un fluido; essa ha infatti le dimensioni di una velocità e spesso viene indicata con il termine di permeabilità, anche se i due concetti sono profondamente differenti. La permeabilità k , infatti, è dipendente unicamente dalle caratteristiche del mezzo, ovvero dalla dimensione e dalla disposizione dei pori del terreno. La conducibilità idraulica K , invece, è legata anche al fluido che si muove nel mezzo ed in particolare alla sua viscosità μ e densità ρ . La conducibilità idraulica K e la permeabilità k sono legate dalla seguente relazione, essendo g l'accelerazione gravitazionale:

$$K = \frac{\rho g k}{\mu}$$

3.3.2 Equazione del moto del flusso in un mezzo completamente saturo

Nel caso di modelli con acquiferi non confinati, l'ambiente di calcolo FEFLOW permette di semplificare notevolmente quanto riportato nel paragrafo 3.3.1 mediante l'opzione "Free" di modellazione della superficie freatica. In questo caso tale algoritmo, basato sulla tecnica BASD (*Best Adaptation to Stratigraphic Data*), adatta la quota geometrica del modello tridimensionale alla superficie freatica dell'acquifero. Infatti, la superficie freatica è definita dal movimento verticale della *mesh* di calcolo facendo coincidere il bordo superiore del modello geometrico con la superficie freatica; di conseguenza, gli strati sottostanti "si muovono" adattandosi.

Così facendo il modello risulta modificato in modo da considerare esclusivamente la zona satura e quindi la massa d'acqua all'interno del mezzo poroso, "eliminando" gli strati non saturi "superflui" ai fini computazionali. Le proprietà degli elementi e dei nodi si adatteranno alla "nuova" stratigrafia. Nella Figura 3.2 si riporta la rappresentazione schematica dell'opzione "Free". Tale approccio permette quindi di semplificare notevolmente la trattazione di *Richards*, eliminando le assunzioni richieste per la determinazione della frangia capillare e della zona non satura o parzialmente satura.

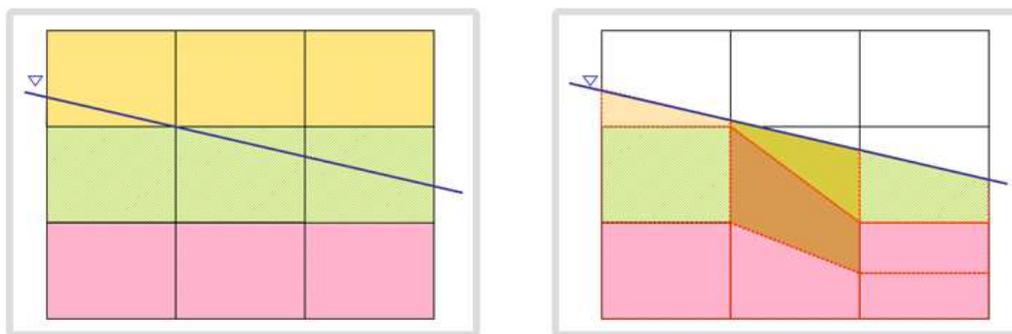


Figura 3.2 Descrizione grafica dell'opzione "Free" per la simulazione della superficie freatica (Guida online FEFLOW)

3.3.3 Equazione di trasporto

I meccanismi di trasporto di massa in falda sono regolati dall'*Equazione del moto convettivo/dispersivo* o *ADE Equation (Advection Dispersion Equation)*. Il codice FEFLOW consente di trovare una soluzione approssimata tridimensionale per l'equazione del trasporto con tutte le sue componenti. Il meccanismo di trasporto, infatti, nasce dalla combinazione di processi convettivi, dispersivi e reattivi che

sono di seguito descritti.

- Il trasporto convettivo o advettivo studia il moto di un soluto che viaggia alla stessa velocità delle acque sotterranee veicolato dal flusso stesso. Il parametro di input specifico per la modellazione della componente advettiva del trasporto è la porosità. La velocità di flusso, in questo caso, è pari alla “velocità efficace” $v_{e,i}$, essendo v_i ($i = x, y, z$) la velocità di Darcy e θ_e la porosità efficace:

$$v_{e,i} = \frac{v_i}{\theta_e} \quad (i = x, y, z)$$

- La dispersione idrodinamica descrive “la dispersione” del soluto in un dominio più ampio di quello della sola componente advettiva. Questo fenomeno combina la diffusione molecolare (indipendente dal trasporto e dovuta a variazioni di concentrazione) e la dispersione meccanica (dovuta a variazioni locali della velocità del flusso). I parametri di input specifici, in questo caso, sono la dispersività α_i ($i = x, y, z$) ed il coefficiente di diffusione molecolare D_0 che, sommati, vanno a formare il coefficiente di dispersione idrodinamica D_i . Essendo $v_{e,i}$ la velocità efficace, il coefficiente di dispersione D_i risulta pari a:

$$D_i = D_0 + \alpha_i \cdot v_{e,i} \quad (i = x, y, z)$$

- Il processo reattivo introduce i ritardi dovuti ai fenomeni di adsorbimento e degradazione. Nel primo caso, anche se a livello microscopico le particelle si muovono con la stessa velocità del fluido, l'interazione con il suolo (adsorbimento/rilascio) provoca, macroscopicamente, una riduzione della velocità media dei soluti rispetto a quella della falda. Per quanto riguarda invece la degradazione, i fenomeni possono essere chimici e/o biologici e comportano una variazione nello spazio e nel tempo della concentrazione dei soluti che tendono a “consumarsi”.

L'equazione di trasporto che regola la variazione di concentrazione C dovuta ai fenomeni sopra descritti, essendo noto il campo di velocità efficace $v_{e,i}$ ($i = x, y, z$) è:

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v_{e,x} \frac{\partial C}{\partial x} - v_{e,y} \frac{\partial C}{\partial y} - v_{e,z} \frac{\partial C}{\partial z} = R \frac{\partial C}{\partial t} + \lambda C$$

dove:

- $D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$ è la componente dispersiva tramite il coefficiente di dispersione D_i ;
- $-v_{e,x} \frac{\partial C}{\partial x} - v_{e,y} \frac{\partial C}{\partial y} - v_{e,z} \frac{\partial C}{\partial z}$ è la componente convettiva;
- $R \frac{\partial C}{\partial t}$ tiene conto dei fenomeni di ritardo;
- λC tiene conto dei fenomeni di degradazione tramite la costante di decadimento λ .

3.3.4 Analisi in condizioni “densità dipendenti”

Il codice di calcolo FEFLOW permette di risolvere le equazioni di flusso e trasporto in falda prima descritte utilizzando l’analisi densità dipendente, tenendo cioè conto della variazione spazio-temporale della densità e della concentrazione dei fluidi analizzati. È immediato comprendere come questa tipologia di analisi risulti utile per lo studio dell’avanzamento del cuneo salino. In questo caso, la densità dell’acqua dolce e di quella salata sono considerate tramite la *Legge di Darcy* da cui dipendono le equazioni di massa e trasporto e che assume la seguente forma:

$$v_i = \frac{-k_i \rho_0 g}{\mu} \left(\frac{\partial h}{\partial x_i} + \tilde{\rho} e_i \right) \quad (i = x, y, z)$$

dove:

v_i è il campo di velocità;

k_i la permeabilità del mezzo poroso;

ρ_0 la densità del fluido in condizioni standard;

g l’accelerazione gravitazionale;

μ la viscosità del fluido;

h il carico idraulico;

e il vettore gravitazionale adimensionalizzato;

$\tilde{\rho}$ la densità relativa.

In presenza di acqua dolce e di mare, la densità relativa $\tilde{\rho}$ risulta essere pari a:

$$\tilde{\rho} = \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0} = 0,025$$

essendo ρ_s la densità dell’acqua di mare con concentrazione pari a $35 \frac{g}{l}$ ($1025 \frac{kg}{m^3}$) e ρ_0 la densità dell’acqua dolce ($1000 \frac{kg}{m^3}$).

Nel codice di calcolo FEFLOW, per tenere conto della presenza dell'acqua di mare è necessario modificare il relativo carico idraulico con il "Carico d'acqua dolce equivalente" (*Equivalent freshwater head*) che, come detto, "trasforma" l'acqua salata in acqua dolce. Tale formulazione permette di ottenere l'andamento corretto del carico idraulico considerando la presenza di acqua salata e la diversa densità della stessa. Pertanto, il carico idraulico in prossimità dei nodi del fondale marino deve assumere un valore tanto maggiore a quello dovuto alla colonna di acqua dolce quanto più è profondo il fondale stesso.

Per descrivere meglio il concetto del carico d'acqua dolce equivalente, si fa riferimento alla Figura 3.3 nella quale due piezometri aperti sono posti in un acquifero contenente acqua salina ad una distanza Z_N dalla base dell'acquifero.

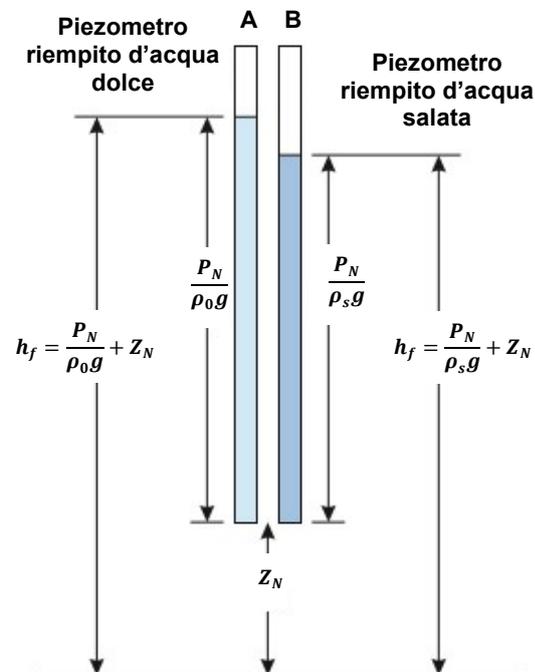


Figura 3.3 Rappresentazione del concetto di "Carico d'acqua dolce equivalente" ("User's Guide to SEAWAT: A Computer Program for Simulation of Three-Dimensional Variable-Density Ground-Water Flow", Book 6, Chapter 7, 2002)

Il piezometro A contiene acqua dolce ed è dotato di un meccanismo che impedisce all'acqua salata della falda di mescolarsi con quella del piezometro; il piezometro B, invece, contiene acqua identica a quella presente nell'acquifero salino. Per il piezometro A, il carico d'acqua dolce equivalente h_f nel punto Z_N è pari a:

$$h_f = \frac{P_N}{\rho_0 g} + Z_N$$

essendo:

Z_N la quota di riferimento;

P_N la pressione idraulica alla quota Z_N ;

ρ_0 la densità dell'acqua dolce (1 000 kg/m³);

g l'accelerazione gravitazionale.

Per il piezometro B, il carico idraulico h riferito all'acqua salina risulta pari a:

$$h = \frac{P_N}{\rho_s g} + Z_N$$

essendo:

Z_N la quota di riferimento;

P_N la pressione idraulica alla quota Z_N ;

ρ_s la densità dell'acqua salina (1 025 kg/m³);

g l'accelerazione gravitazionale.

Quindi, a parità di pressione e altitudine, il carico idraulico varia con la densità. Pertanto la "conversione" dell'acqua salata in dolce può essere fatta utilizzando la seguente espressione:

$$h_f = \frac{\rho_s}{\rho_0} h - \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0} Z$$

essendo:

h_f il carico d'acqua dolce equivalente;

h il carico idraulico relativo all'acqua salina;

ρ_s la densità dell'acqua salina (1 025 kg/m³);

ρ_0 la densità dell'acqua dolce (1 000 kg/m³);

Z la differenza di quota del punto in analisi rispetto alla superficie idrostatica di riferimento.

3.3.5 Risoluzione stazionaria e transitoria delle equazioni

Considerando la variabile tempo, i modelli numerici si suddividono in stazionari e transitori. Nei primi i risultati delle simulazioni rappresentano la condizione all'equilibrio del sistema; nei secondi, invece, è possibile registrare l'evoluzione nel tempo delle variabili di studio fino al raggiungimento dello stadio finale.

Infatti, le derivate temporali presenti nelle equazioni di flusso e trasporto in falda consentono di descrivere l'andamento nel tempo della distribuzione spaziale delle variabili in gioco, partendo dal "tempo zero" a cui corrispondono le

condizioni iniziali. Le analisi transitorie forniscono sicuramente informazioni aggiuntive rispetto a quelle stazionarie, richiedendo, naturalmente, costi computazionali maggiori ma consentendo di valutare la dinamicità e l'evoluzione del fenomeno nel suo complesso.

3.4 Definizione delle condizioni iniziali e al contorno

Le condizioni iniziali di un modello di flusso e trasporto rappresentano la distribuzione dei carichi idraulici e della concentrazione dei soluti all'interno del dominio di calcolo all'inizio (tempo zero) della simulazione; le condizioni al contorno, invece, permettono di fissarne l'andamento nel tempo e nello spazio entro i limiti del dominio. In particolare, nei modelli di flusso e trasporto delle acque sotterranee, è possibile utilizzare quattro tipi di condizioni al contorno nello spazio e nel tempo essendo h il carico idraulico e C la concentrazione:

- *Condizione del 1° Tipo (o di Dirichlet)*

$$h(x, y, z, t) = \text{costante}$$

$$C(x, y, z, t) = \text{costante}$$

La condizione di *Dirichlet* fissa i valori che la variabile dipendente deve assumere in corrispondenza di determinati nodi ed è utilizzata, ad esempio, per imporre le altezze piezometriche dovute alla presenza di invasi. In FEFLOW, nei modelli di flusso tale condizione è realizzata mediante l'opzione *Hydraulic-Head BC*, per i modelli di trasporto si utilizza l'opzione di concentrazione costante *Mass-Concentration BC*.

- *Condizione del 2° Tipo (o di Neumann)*

$$\frac{\partial h(x, y, z, t)}{\partial n} = \text{costante}$$

$$\frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial n} = \text{costante}$$

La condizione di *Neumann* fissa i valori che la derivata della variabile dipendente deve assumere sul contorno del dominio. Tale condizione è utile per specificare il flusso attraverso un determinato elemento (n rappresenta un vettore direzionale perpendicolare uscente dal confine). In FEFLOW, nei modelli di flusso tale condizione è realizzata mediante l'opzione *Fluid-Flux BC*, per i modelli di trasporto si utilizza l'opzione di concentrazione costante *Mass-Flux BC*.

- *Condizione del 3° Tipo (o di Cauchy)*

$$\frac{\partial h}{\partial n} + sh = \text{costante} \quad s = \text{generica costante}$$

$$\frac{\partial C}{\partial n} + rC = \text{costante} \quad r = \text{generica costante}$$

La condizione di *Cauchy* fissa il valore della variabile dipendente e della sua derivata direzionale normale alla superficie differenziale; ciò corrisponde a imporre contemporaneamente una condizione di *Neumann* e una di *Dirichlet*. L'assegnazione avviene mediante l'utilizzo di un coefficiente di trasferimento che deve essere applicato in corrispondenza dei nodi e degli elementi in contatto con il bordo interessato. Nel caso di analisi idrauliche, ad esempio, il coefficiente di trasferimento ha il significato di una conducibilità idraulica; per questioni termiche, esso rappresenta invece un valore di trasmittanza. In FEFLOW, nei modelli di flusso tale condizione è introdotta mediante l'opzione *Fluid-Transfer BC*, per i modelli di trasporto si utilizza, invece, l'opzione di concentrazione costante *Mass-Transfer BC*.

- *Condizione del 4° Tipo*

L'ambiente di calcolo FEFLOW include una quarta tipologia di condizione al contorno per la simulazione di iniezione/estrazione di flusso o massa in corrispondenza di un nodo o di un gruppo di nodi allineati. Tale condizione, matematicamente, è equivalente al termine di "creazione" di massa nell'equazione di equilibrio e risulta utile, ad esempio, per la simulazione di pozzi (di emungimento o immissione). Nei modelli di flusso la condizione è realizzata mediante l'opzione *Well BC/Multilayer Well BC*, per i modelli di trasporto si utilizza l'opzione *Mass nodal sink/source BC*.

Sintesi

Il Capitolo 3 è stato dedicato al metodo numerico agli elementi finiti e all'ambiente di calcolo FEFLOW utilizzato nella costruzione del modello per lo studio dell'intrusione salina nel sito della Raffineria di Milazzo.

Nel paragrafo 3.1 è stata fatta una breve introduzione all'analisi numerica, mettendone in evidenza la potenza e i principali vantaggi rispetto alle trattazioni in forma chiusa. Riassumendo quanto detto, emerge che l'analisi numerica, a differenza dei metodi analitici, consente la riproduzione attendibile di qualsiasi fenomeno reale e la risoluzione, seppur approssimata, delle equazioni che lo governano.

Nel paragrafo 3.2 è stato trattato dettagliatamente il metodo agli elementi finiti (FEM) utilizzato nell'analisi dell'intrusione salina e alla base degli algoritmi su cui si basa il software FEFLOW. L'estrema flessibilità di tale metodologia ne giustifica la diffusione e l'applicazione in numerosissimi settori. Il principio alla base del FEM è la discretizzazione della realtà modellata in porzioni più piccole dette, appunto, elementi finiti. Ogni fenomeno da studiare viene rappresentato con una serie di variabili definite, seppur in modo approssimato, dalla combinazione di funzioni note e dei valori noti assunti dalle variabili stesse in corrispondenza di punti predefiniti. Una volta determinato l'andamento delle variabili, è possibile ricavare le grandezze dipendenti necessarie per la risoluzione delle equazioni e, quindi, per la determinazione del fenomeno.

Nel paragrafo 3.3 sono state introdotte le espressioni matematiche poste alla base del funzionamento del software agli elementi finiti FEFLOW. Sono state descritte: l'equazione del moto del flusso di *Richards* per la soluzione del fenomeno idraulico (applicata anche a un mezzo completamente saturo) e l'equazione del moto convettivo/dispersivo per l'analisi dell'avanzamento del cuneo salino. Le equazioni sono state sviluppate in condizioni dipendenti dalla densità, al fine di tener conto della variazione spazio-temporale della densità dovuta alla salinità dell'acqua. È stata inoltre presa in considerazione la variabile tempo che divide i modelli numerici in stazionari e transitori: nei primi vengono individuate direttamente le condizioni all'equilibrio, nei secondi, invece, è possibile monitorare l'evoluzione nel tempo delle variabili di studio fino al raggiungimento della configurazione finale.

Nel paragrafo 3.4 sono state illustrate le condizioni iniziali e al contorno attribuibili ad un modello numerico e le opzioni di assegnazione nel software FEFLOW.

4 SVILUPPO DEL MODELLO AGLI ELEMENTI FINITI PER LO STUDIO DELL'INTRUSIONE SALINA

Premessa

Il seguente capitolo è dedicato allo sviluppo del modello numerico utilizzato per l'analisi della gestione idrica del sottosuolo della Raffineria di Milazzo, al fine di studiare l'acquifero in differenti scenari di emungimento e di re-immissione, con particolare attenzione all'avanzamento del cuneo salino. Il modello matematico di flusso e trasporto in falda è stato costruito utilizzando il software FEFLOW 7.202 (DHI-WASY GmbH), sulla base dei dati raccolti durante la caratterizzazione idrogeologica del sito ed esposti nel Capitolo 2.

Poiché in ogni analisi numerica è necessario che il modello sia attendibile e congruente con la realtà, le informazioni di input e le assunzioni iniziali fatte sono state via via modificate tramite un processo di calibrazione e validazione, affinché i valori delle variabili scelte riuscissero a riprodurre situazioni semplici note, per permettere poi l'applicazione del modello anche a casi più complessi e altrimenti non risolvibili. Ulteriori aspetti presi in esame sono stati la geometria e le dimensioni del modello. Quest'ultimo, infatti, deve essere di dimensioni più ridotte possibili in modo che, con minimi costi computazionali, rappresenti fedelmente il fenomeno da studiare. Per il caso in esame sono stati analizzati tre modelli con diverse dimensioni lungo la direzione nord-sud (direzione parallela al flusso d'acqua e perpendicolare alla linea di costa), in modo da trovare il miglior compromesso tra l'attendibilità dei risultati e l'efficienza computazionale.

Nel corso delle simulazioni, è stato anche necessario modificare le condizioni iniziali e al contorno, al fine di riprodurre gli scenari di alto o basso piezometrico. Il sito in esame, infatti, presenta discrete variazioni del livello dell'acquifero semiconfinato con la stagionalità. In particolare, il periodo aprile-ottobre è

caratterizzato da una condizione di alto piezometrico (alto livello della falda), mentre quello novembre-marzo da una condizione di basso piezometrico (basso livello della falda). È risultato quindi interessante modellare la gestione idrica della Raffineria in entrambi i casi, essendo il fenomeno dell'intrusione salina strettamente correlato con il livello dell'acquifero che, come detto, presenta nel sito variazioni anche dell'ordine del metro in relazione al periodo.

4.1 Scelta della geometria del modello e dell'acquifero

Considerata la complessità dell'area oggetto di studio sia con riferimento all'estensione che alla dislocazione planimetrica dei pozzi, si è deciso di modellarne soltanto una porzione, al fine di creare un modello schematico che permettesse comunque di analizzare i fenomeni di flusso e trasporto in falda e apprezzare i dati di output delle simulazioni. La geometria del modello, quindi, è stata definita in modo da individuare un'area rappresentativa del sito e del fenomeno da studiare.

Di seguito si riportano i dati geometrici utilizzati per la costruzione del modello. Tutte le misure sono state scelte facendo riferimento alle dimensioni e alle distanze rilevate in sito, ad eccezione dell'estensione del modello in direzione nord – sud (direzione parallela al flusso d'acqua e perpendicolare alla linea di costa). Tale estensione, infatti, è stata determinata per tentativi, ricercando il valore minimo che soddisfacesse contemporaneamente l'esigenza di riprodurre correttamente la piezometria reale e quella di minimizzare i costi computazionali. A tale scopo sono stati costruiti tre diversi modelli variando la dimensione nord – sud (e il relativo carico idraulico imposto sul bordo sud) e mantenendo fisse le altre misure; il modello rispondente alle condizioni di cui sopra è risultato quello avente la dimensione ricercata pari a 1 065 m. La metodologia seguita per la definizione della geometria del modello è riportata e descritta in dettaglio nel paragrafo 4.5.

La planimetria e la sezione trasversale della porzione del sito modellata sono riportate nella Figura 4.1, in cui sono indicate le dimensioni del modello, le posizioni dei pozzi sia di emungimento che di re-immissione, la linea di costa (linea tratteggiata in nero) e il livello del mare (linea tratteggiata in azzurro nella sezione nord – sud) assunto come quota zero di riferimento.

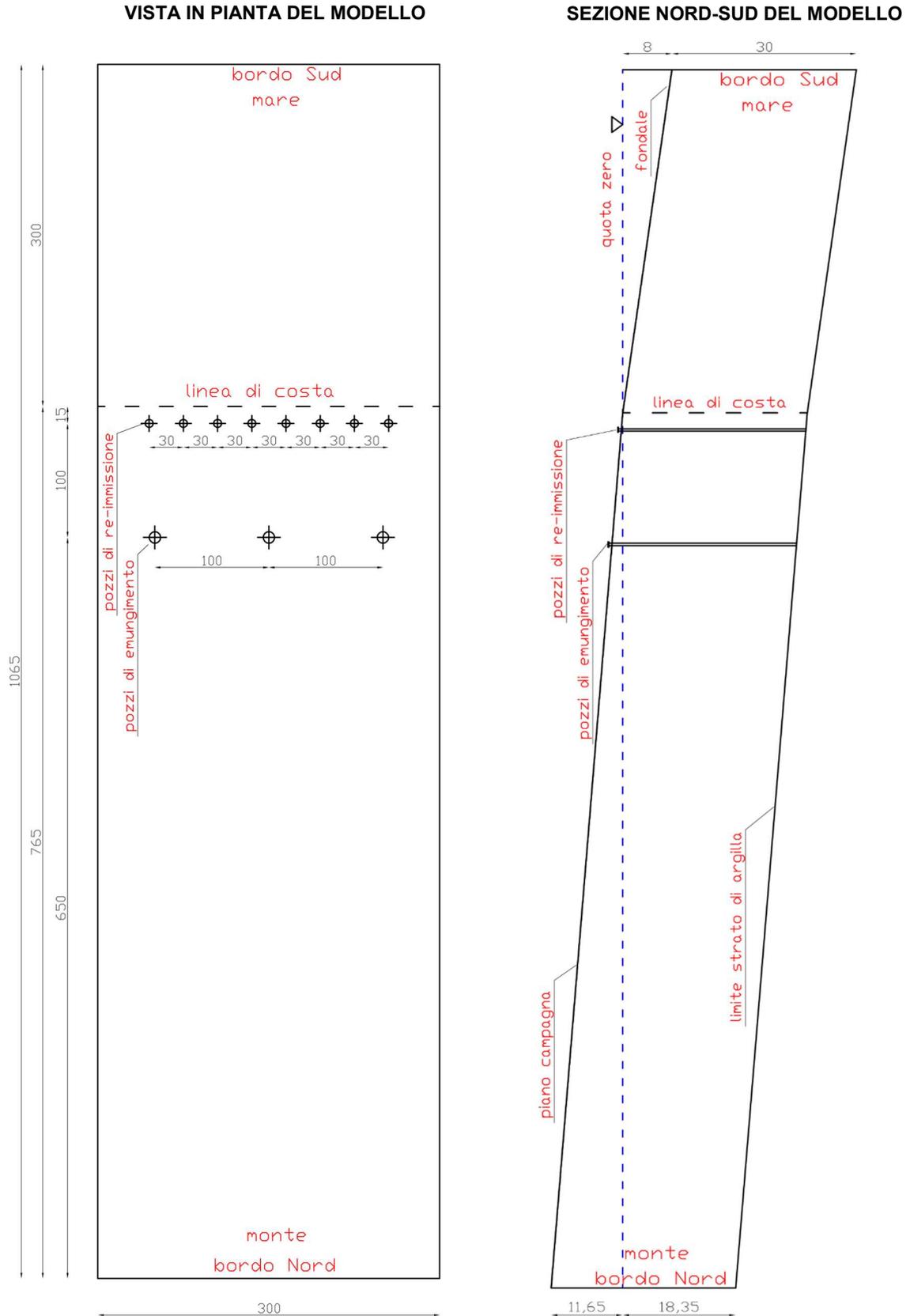


Figura 4.1 Vista in pianta e sezione trasversale del modello con la disposizione dei pozzi, la linea di costa (linea nera tratteggiata) e il livello del mare assunto come quota di riferimento (linea azzurra tratteggiata)

4.1.1 Schematizzazione planimetrica e altimetrica della geometria del modello

Per la geometria planimetrica del modello, sono state assunte le dimensioni di 300 m in direzione est-ovest (direzione parallela alla linea di costa) e di 1 065 m in senso nord-sud (direzione parallela al flusso d'acqua e perpendicolare alla linea di costa). Come detto precedentemente, per la scelta dell'estensione latitudinale in direzione nord-sud si rimanda a quanto scritto nel paragrafo 4.5.

I pozzi di emungimento e di re-immissione sono stati posizionati su due linee parallele alla linea di costa. I pozzi di emungimento, posti a 115 m dalla linea di costa, sono stati modellati con tre unità con una distanza di interasse di 100 m, mentre la batteria di re-immissione è stata realizzata con 8 pozzi con interasse di 30 m, ad una distanza dalla linea di costa pari a 15 m. Tali dimensioni sono state assunte mediando i valori planimetrici di progetto della barriera idraulica che, vista la complessità del sito industriale, risultano discretamente variabili. Infatti, il posizionamento dei pozzi, oltre che dall'ottimizzazione dell'efficienza idraulica, è stato dettato dalla disposizione planimetrica degli impianti della Raffineria.

Per quanto riguarda il dimensionamento altimetrico del modello, il livello del mare è stato assunto come quota di riferimento. L'altimetria è stata definita ripetendo a monte l'andamento del dislivello medio esistente tra i pozzi di re-immissione e quelli di emungimento. Tale differenza di quota di 1,50 m presenta una pendenza di 1,5 % e ha determinato una quota di 11,65 m sul confine sud del modello. In corrispondenza della linea di costa e del fondale marino, analizzando l'andamento delle isobate, è stata imposta una pendenza costante pari a 2,7%.

4.1.2 Schematizzazione dell'acquifero e descrizione dei pozzi

Per la determinazione delle condizioni idrauliche all'interno del modello, è necessario dapprima fare riferimento al concetto di gradiente idraulico. Il gradiente idraulico i è un parametro idrogeologico che indica il carico idraulico che permette all'acqua di spostarsi da un punto a carico più alto ad un altro a carico più basso, vincendo la resistenza opposta dal terreno. Essa è una grandezza di notevole interesse ed è definita come il rapporto tra la perdita di carico Δh (differenza del livello di falda) tra due punti e la distanza L che li separa:

$$i = \frac{\Delta h}{L} = \frac{h_1 - h_2}{L}$$

Quindi, una volta fissato il gradiente idraulico, nota la distanza tra i due punti e il livello della falda in uno di questi, è possibile determinare il livello dell'acquifero nell'altro punto ricavando la quantità Δh . Nel caso in esame, considerando noto il livello della falda in prossimità della costa (esso coincide con la quota zero) e imponendo i valori del gradiente assunti, è stato possibile ricostruire l'andamento del carico idraulico fino al bordo sud del modello, sia in condizioni di alto che di basso piezometrico.

La geometria dell'acquifero è stata ricostruita nel modello partendo dalle misure piezometriche. Come risulta dai dati rilevati in sito, in condizioni di alto piezometrico l'altezza di falda è pari a 0,2 m s.l.m. in corrispondenza della batteria di re-immissione e a 1,2 m s.l.m. in prossimità dei pozzi di emungimento. In questo caso, per la ricostruzione dell'andamento del livello dell'acquifero, è stato assunto un gradiente idraulico pari all'1%. Durante il periodo di basso piezometrico, invece, l'altezza di falda risulta uguale a 0,2 m s.l.m. in corrispondenza dei pozzi di re-immissione e a 0,7 m s.l.m. per quelli di emungimento, con un gradiente idraulico dello 0,5%.

Come riportato nel paragrafo 2.4.2, la base dell'acquifero freatico è stata posta in corrispondenza dello strato argilloso a bassa permeabilità alla profondità di 30 m dal piano campagna, con un andamento ad esso parallelo.

Le caratteristiche dei pozzi di emungimento e di re-immissione utilizzate nel modello, come da progetto, sono di seguito riportate:

- Diametro dei pozzi pari a 30 cm;
- Altezza bocca-pozzo rispetto al piano campagna pari a 50 cm;
- Lunghezza totale pari a 30,5 m;
- Pozzi completamente immorsati nello strato di argilla.

4.2 Costruzione della mesh e discretizzazione spaziale del dominio di calcolo

Definite le dimensioni del modello e la geometria dell'acquifero, si è proceduto all'imputazione dei dati relativi nel software FEFLOW, ciò per costruire lo schema spaziale del modello, un volume delimitato dai bordi dell'area di studio e al cui interno sono individuati gli elementi caratterizzanti il modello stesso. È stata così definita la porzione di spazio successivamente discretizzata con la creazione della *mesh* e quindi degli elementi finiti.

Nel software FEFLOW tale “contenitore” prende il nome di *supermesh* ed è costituito da entità geometriche. Per il caso in esame, la *supermesh* è riportata nella Figura 4.2 ed è formata da linee per i bordi esterni e la costa e da punti in corrispondenza dei pozzi.

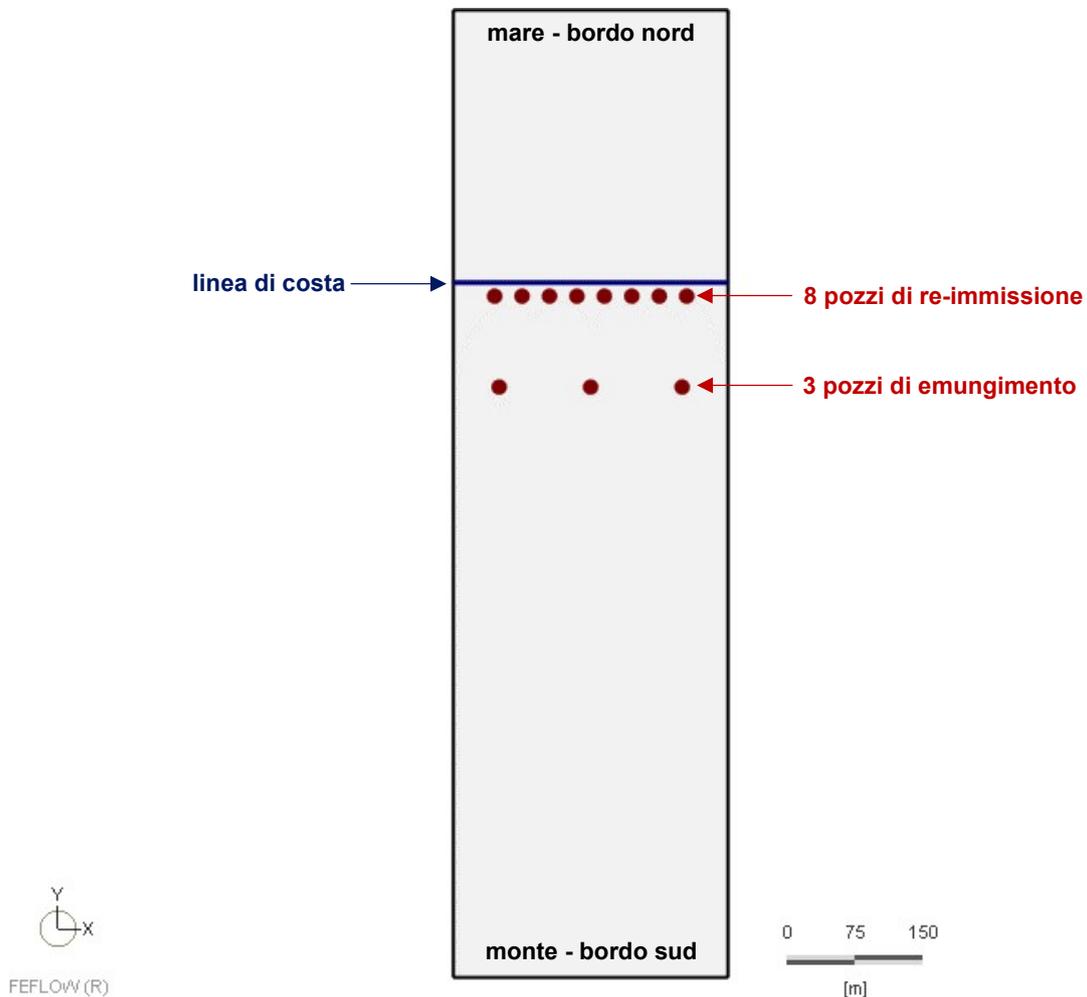


Figura 4.2 Dominio di calcolo, costruzione della *supermesh*

In seguito, la *supermesh* in pianta è stata discretizzata con una *mesh* costituita da 3 501 elementi finiti triangolari i cui cateti hanno dimensioni indicativamente variabili tra 2 m in prossimità dei pozzi e 20 m per la parte rimanente (Figura 4.3).

La realizzazione della *mesh* riduce l’area di studio in porzioni più piccole, gli elementi finiti appunto, che risultano connessi tra loro tramite punti detti nodi. Come spiegato in dettaglio nel paragrafo 3.2, gli elementi finiti e i nodi creano la *mesh*, una “rete” all’interno della quale studiare l’andamento incognito delle variabili che governano i fenomeni da rappresentare, permettendone la ricostruzione approssimata e favorendo la risoluzione delle equazioni. Nel modello in esame, il numero degli elementi finiti nelle aree in prossimità dei pozzi

è stato infittito per aumentare il numero dei nodi e quindi la "risoluzione" dei risultati in prossimità delle aree ritenute di interesse.

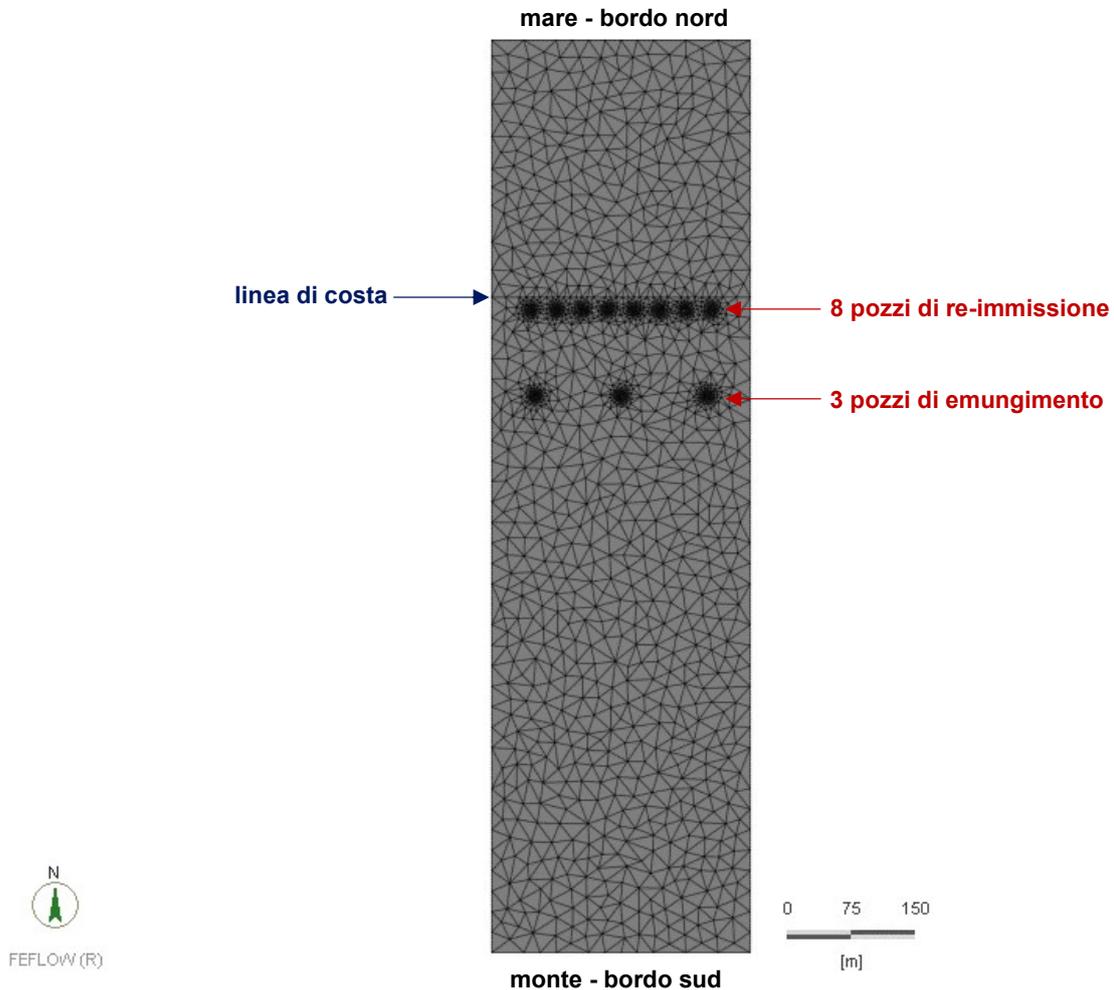


Figura 4.3 Costruzione della mesh con elementi finiti triangolari infittiti in prossimità dei pozzi

Una volta definita la geometria in pianta del modello, si è proceduto con l'estrusione verticale per svilupparlo tridimensionalmente. Per far ciò, il software FEFLOW permette di inserire strati sottostanti o sovrastanti alla sezione planimetrica prima definita in modo da riprodurre le profondità e le altezze. Gli strati che compongono il modello sono detti *layer* e sono delimitati superiormente e inferiormente da superfici di spessore trascurabile dette *slice*. In ciascun *layer* la proiezione verticale della *mesh* determina dei volumi prismatici e genera una discretizzazione volumetrica. Nel caso in esame sono stati inseriti 20 *layer* (21 *slice*) per un totale di 70 020 elementi prismatici triangolari. Ad ogni *layer* è stato attribuito uno spessore di 1,5 m per rappresentare il terreno fino allo strato di argilla assunto come base dell'acquifero e limite inferiore del modello (30 m dal piano campagna). La morfologia del terreno è stata impostata secondo i dati della

caratterizzazione idrogeologica del sito riportati nel paragrafo 2.4.2. Inoltre, in prossimità delle aree di interesse e dei sistemi idraulici aggiuntivi (interfaccia acqua dolce-acqua salata, pozzi di emungimento e pozzi di re-immissione), la *mesh* è stata ulteriormente infittita per aumentare la discretizzazione e quindi la precisione dei risultati.

Nella Figura 4.4 è riportata una vista tridimensionale del modello in cui sono evidenti i *layer*, gli *slice* ed in particolar modo la *mesh*; le dimensioni verticali sono state amplificate rispetto a quelle orizzontali per una migliore rappresentazione grafica.

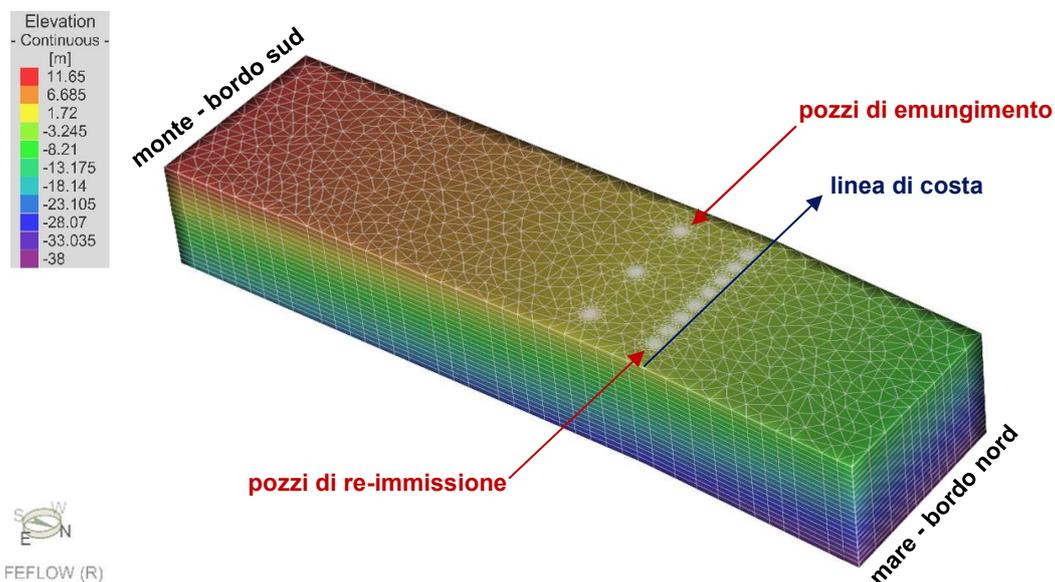


Figura 4.4 Vista 3D del modello estruso verticalmente con indicazioni sui pozzi e la linea di costa (fattore di scala verticale pari a 5 volte quello orizzontale)

4.3 Impostazione delle condizioni iniziali e al contorno

Facendo riferimento ai concetti descritti nel paragrafo 3.4, le condizioni al contorno idrauliche assunte sono le seguenti:

- In alto piezometrico, a tutti i nodi del bordo sud è stato imposto un carico piezometrico di 7,65 m (condizione al contorno di *Dirichlet*), determinato da un gradiente idraulico dell'1% partendo dalla linea di costa (distanza bordo sud – linea di costa uguale a 765 m);
- In basso piezometrico, a tutti i nodi del bordo sud è stato imposto un carico piezometrico di 4,00 m (condizione al contorno di *Dirichlet*), determinato da un gradiente idraulico dello 0,5% partendo dalla linea di costa (distanza

- bordo sud – linea di costa uguale a 765 m);
- In entrambe le condizioni di alto e basso piezometrico, per tutti i nodi che ricadono nella porzione del modello occupata dal mare, il carico piezometrico assunto è stato calcolato come carico piezometrico d'acqua dolce equivalente (condizione al contorno di *Dirichlet*, paragrafo 3.3.4);
 - In corrispondenza dei pozzi è stata utilizzata la condizione al contorno "*Multilayer Well*" che simula la captazione o l'iniezione di acqua in corrispondenza di un singolo nodo o di un gruppo di nodi verticalmente allineati in profondità all'interno del modello (Figura 4.5);
 - In entrambe le condizioni di alto e basso piezometrico, a tutti i nodi dei bordi est e ovest è stato imposto un flusso nullo (condizione al contorno di *Neumann*), in modo da imporre il movimento d'acqua esclusivamente secondo l'asse nord – sud.

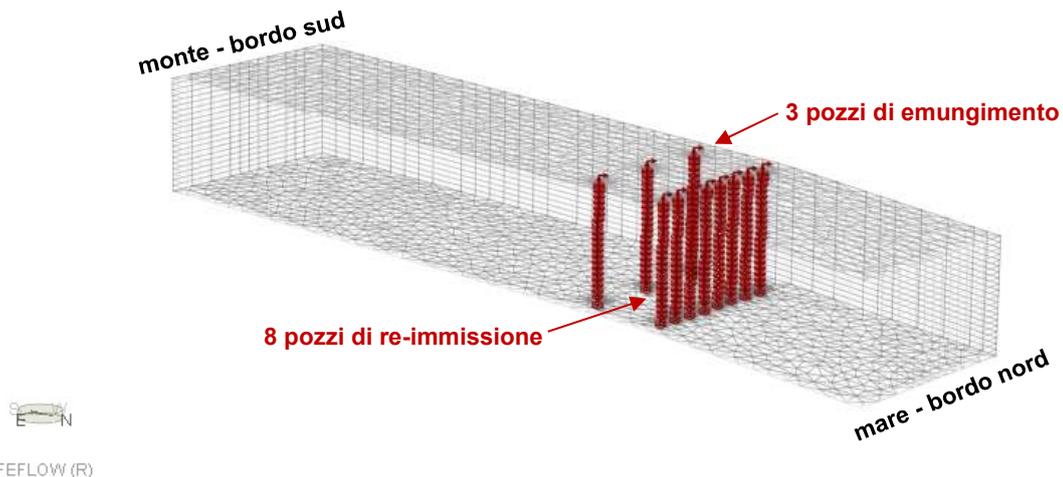


Figura 4.5 Condizione al contorno idraulica "*Multilayer Well*" in corrispondenza dei pozzi, vista 3D (fattore di scala verticale pari a 5 volte quello orizzontale)

Le condizioni al contorno idrauliche di *Dirichlet* come sopra definite sono rappresentate nelle Figure 4.6 (vista in pianta) e 4.7 (vista tridimensionale); in quest'ultima è stato assunto un fattore di scala verticale pari a cinque volte quello orizzontale per una migliore visualizzazione grafica. I nodi per i quali è stato imposto il carico idraulico sono evidenziati con un cerchietto in azzurro.

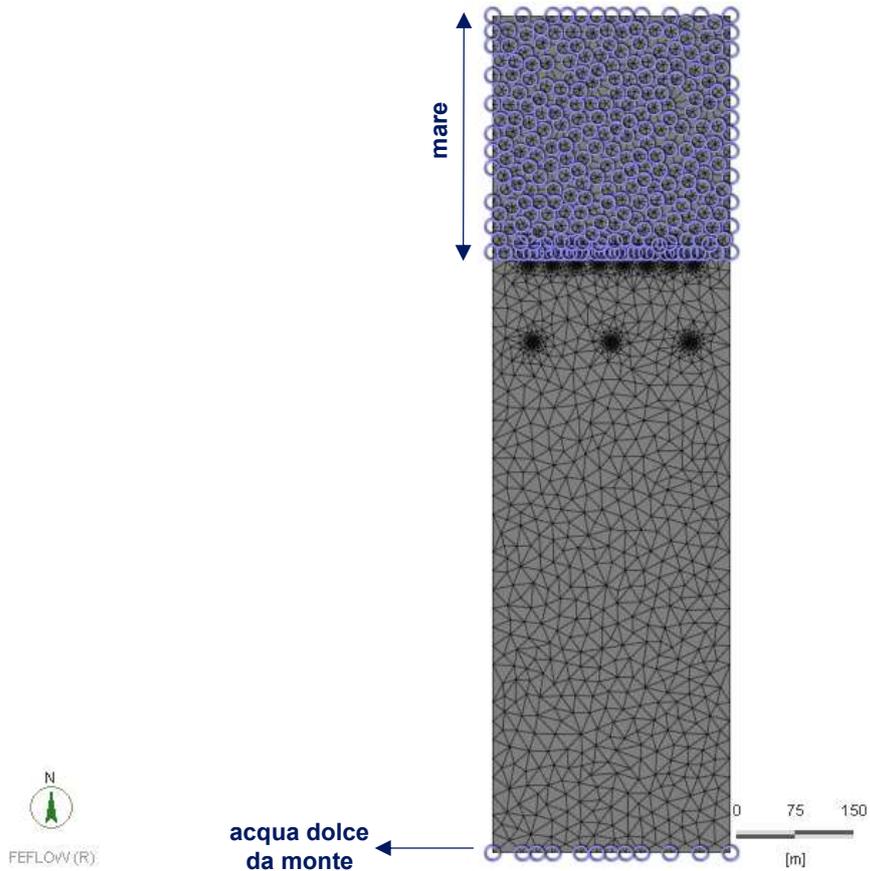


Figura 4.6 Impostazione delle condizioni al contorno idrauliche, vista in pianta del modello

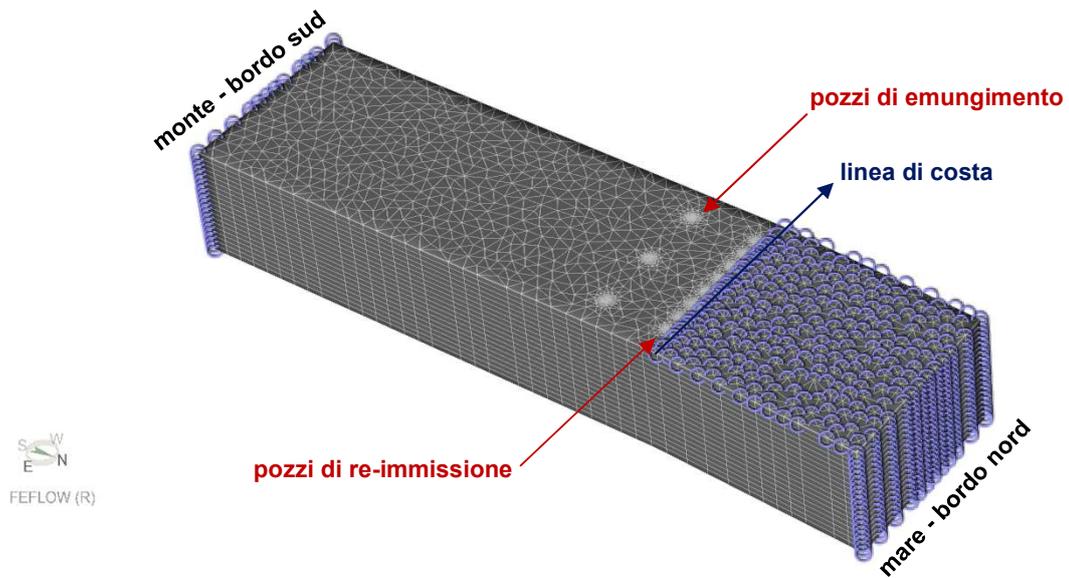


Figura 4.7 Impostazione delle condizioni al contorno idrauliche, vista 3D (fattore di scala verticale pari a 5 volte quello orizzontale)

Per le condizioni al contorno relative alla salinità dell'acqua di mare, è stata considerata una concentrazione di cloruri pari a 35 000 mg/l che incrementa la densità dell'acqua di 0,025 kg/l, portandola a 1 025 kg/m³. Le condizioni al contorno relative alla salinità sono state assunte in entrambi gli scenari di alto e basso piezometrico come di seguito descritto:

- Per tutti i nodi del bordo sud è stata impostata una concentrazione salina di 0 mg/l (acqua dolce proveniente da monte, condizione al contorno di *Dirichlet*);
- Per tutti i nodi che ricadono nella porzione del modello occupata dal mare è stata assunta una concentrazione salina di 35 000 mg/l (acqua di mare, condizione al contorno di *Dirichlet*).

Anche per le condizioni iniziali (idrauliche e di salinità) si è fatto riferimento a quanto riportato nel paragrafo 3.4. Mentre le condizioni al contorno risultano indispensabili per la risoluzione delle equazioni che governano i fenomeni da studiare, quelle iniziali "accelerano la convergenza" verso la soluzione con una notevole diminuzione dei tempi computazionali. Le condizioni iniziali, infatti, vengono imposte a ciascuna delle variabili incognite del modello e consentono all'algoritmo di calcolo di raggiungere l'equilibrio mediante un processo iterativo, partendo da valori delle incognite non nulli ma vicini alla soluzione finale.

Per il caso in esame, le condizioni iniziali sono state imposte sia per il carico idraulico che per la salinità. In particolare:

- Per tutti i nodi del modello è stato assunto un carico idraulico compreso tra 1 e 2 m in entrambi gli scenari di alto e basso piezometrico;
- A tutti i nodi ricadenti nella fascia compresa tra la linea di costa e il bordo nord è stato imposto un valore di salinità pari a 35 000 mg/l, mentre ai rimanenti il valore nullo. Tale condizione è riportata nella Figura 4.8 in cui il massimo valore di salinità è indicato in rosso e quello nullo in viola.

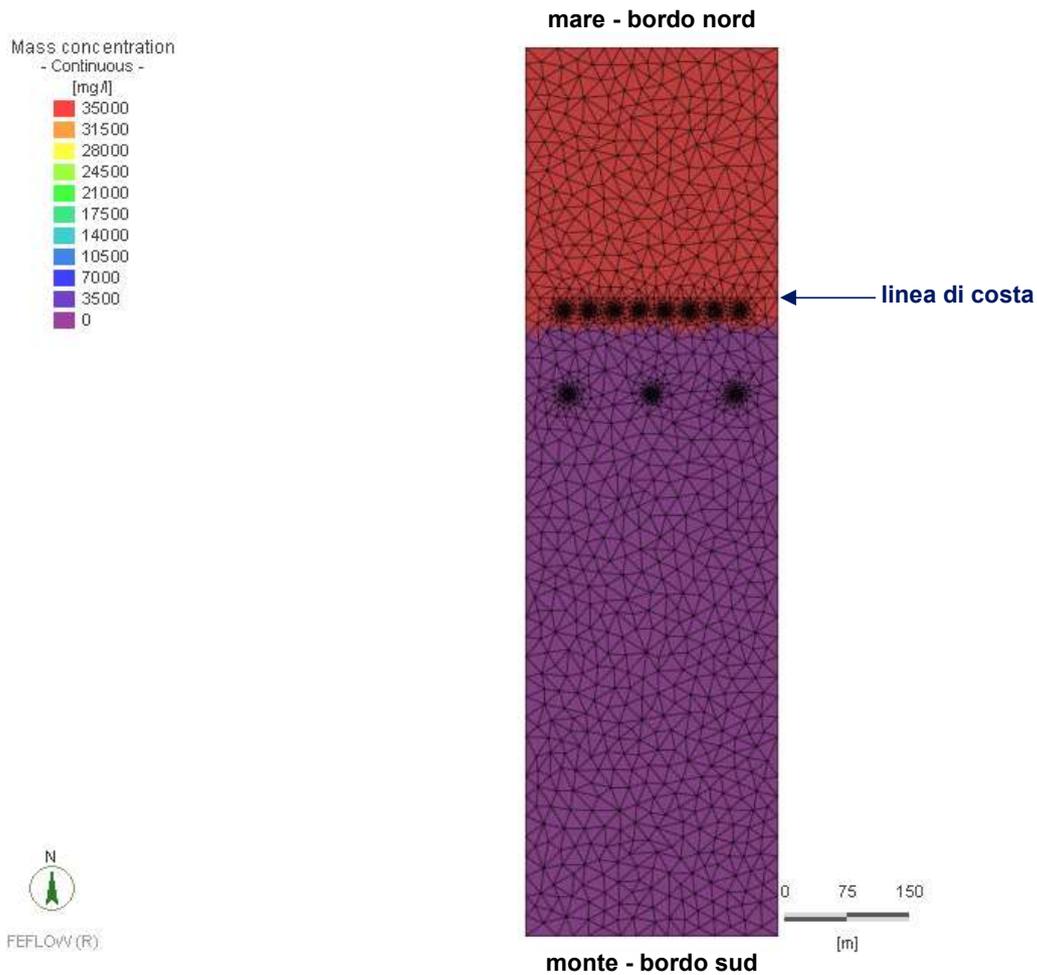


Figura 4.8 Assegnazione delle condizioni iniziali di salinità, vista planimetrica del modello

4.4 Proprietà del terreno e determinazione della conducibilità idraulica

Per tutte le proprietà del terreno sono stati utilizzati i valori di default proposti dal software FEFLOW, ad eccezione della conducibilità idraulica K determinata mediante alcune prove idrauliche eseguite in sito. Da queste è emersa la presenza di materiali più permeabili nella zona occidentale ($K = 7 \cdot 10^{-4}$ m/s) e di meno permeabili ($K = 4 \cdot 10^{-4}$ m/s) nel settore orientale; è emerso anche un diverso comportamento del terreno lungo le tre direzioni spaziali (comportamento anisotropo – dipendenza delle proprietà di un mezzo dalla direzione lungo la quale le stesse vengono considerate). Può accadere, infatti, che alcuni materiali presentino caratteristiche differenti a seconda della loro conformazione o in relazione alla direzione lungo la quale vengono sollecitati.

In genere, rispetto alla conducibilità idraulica, un terreno presenta un comportamento ortotropo, con uguali valori di conducibilità nel piano xy e pari a un decimo dei precedenti lungo l'asse z. Per il caso in esame si è assunta una distribuzione della conducibilità idraulica pari a:

$$K_x = K_y = 6 \cdot 10^{-4} m/s \quad K_z = 6 \cdot 10^{-5} m/s$$

Oltre ai dati geometrici, alle proprietà del terreno, alle condizioni iniziali e al contorno, sono state settate altre impostazioni del software che riguardano le modalità con cui le analisi vengono condotte. Tra queste impostazioni si riportano le seguenti:

- Opzione "*condizione transitoria*" – permette di monitorare l'andamento delle variabili nel tempo fino al raggiungimento della convergenza (paragrafo 3.3.5);
- Opzione "*Free*" – consente di adattare lo strato superficiale del modello alla superficie freatica superiore dell'acquifero, escludendo dall'analisi la porzione non satura del terreno (paragrafo 3.3.2);
- *Durata delle simulazioni* – valore impostato a 10 000 giorni in modo da essere certi di ottenere risultati significativi e attendibili in quanto il fenomeno dell'intrusione salina è particolarmente lento e raggiunge la condizione di equilibrio in tempi abbastanza dilatati.

4.5 Valutazione dell'estensione del modello nella direzione nord – sud

La geometria del modello numerico deve essere scelta in modo da garantire l'assenza di ogni tipo di interazione tra i bordi e l'area in cui il fenomeno ha luogo, affinché i dati di output siano sufficientemente rappresentativi. Per il caso in esame l'unica dimensione a dover essere scelta, essendo le altre fissate secondo le informazioni riportate nel paragrafo 4.1.1, è stata l'estensione del modello secondo l'asse nord – sud. Tale valore è il più piccolo che permette di evitare l'interazione con i bordi, garantendo, nello stesso tempo, minimi costi computazionali. Per la determinazione dell'estensione longitudinale del modello, sono stati costruiti tre diversi modelli variando la distanza del bordo sud dai pozzi di emungimento; in particolare, si sono così ottenute le seguenti geometrie (Figura 4.9):

1. Geometria ridotta

- Distanza bordo sud – pozzi di emungimento pari a 350 m;
- Estensione longitudinale totale del modello uguale a 765 m;
- Carico idraulico imposto sul bordo sud secondo la condizione al contorno di *Dirichlet* pari a 4,65 m s.l.m.

2. Geometria media

- Distanza bordo sud – pozzi di emungimento pari a 650 m;
- Estensione longitudinale totale del modello uguale a 1 065 m;
- Carico idraulico imposto sul bordo sud secondo la condizione al contorno di *Dirichlet* pari a 7,65 m s.l.m.

3. Geometria estesa

- Distanza bordo sud – pozzi di emungimento pari a 2 050 m;
- Estensione longitudinale totale del modello uguale a 2 365 m;
- Carico idraulico imposto sul bordo sud secondo la condizione al contorno di *Dirichlet* pari a 21,65 m s.l.m.

Per ogni modello è stato determinato il carico idraulico in due differenti scenari:

- In condizioni “naturali” senza alcuna attività di emungimento;
- Con la batteria di pozzi di emungimento attiva con una portata totale di 150 m³/h (50 m³/h per ogni pozzo).

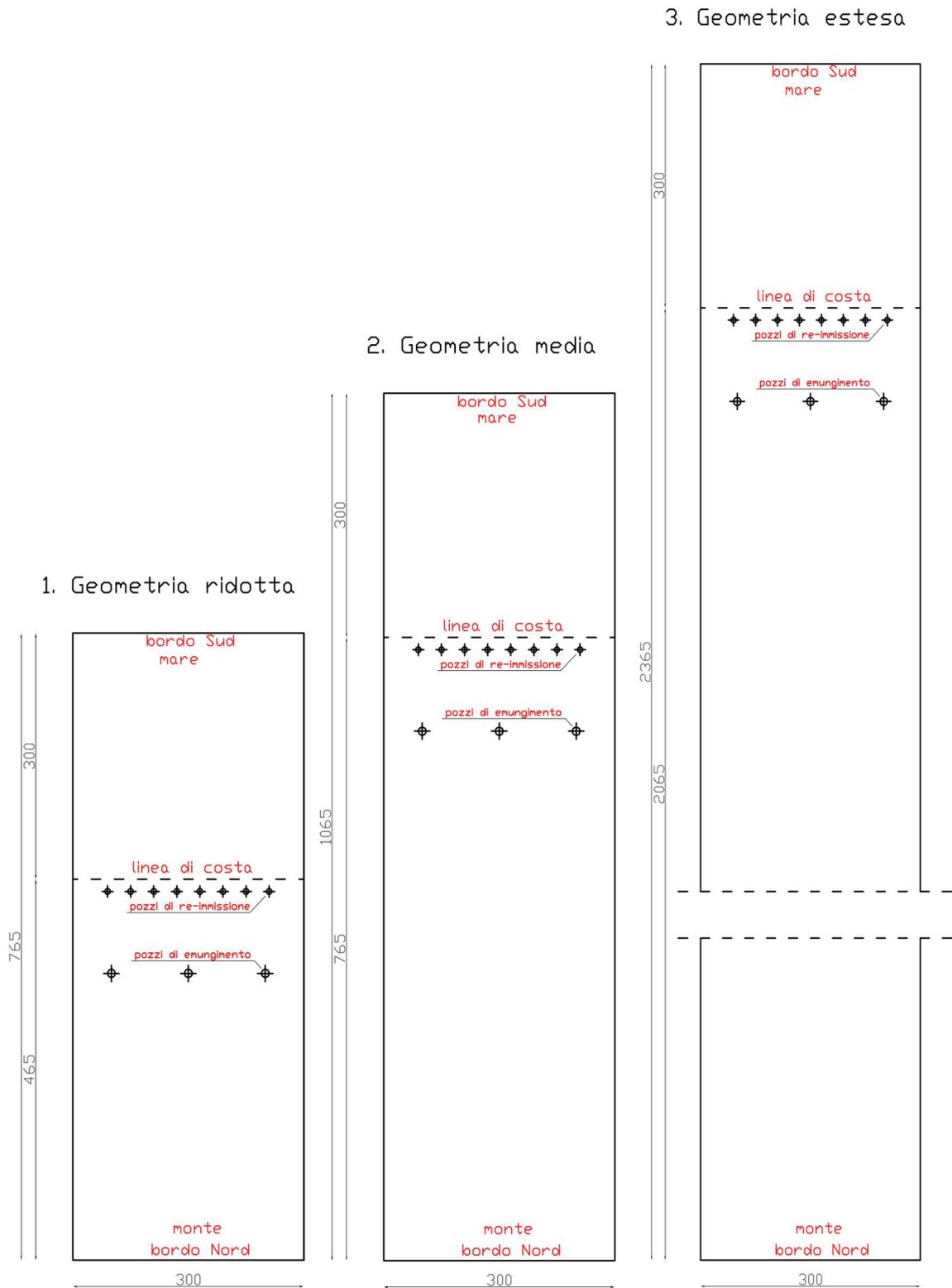


Figura 4.9 Schematizzazione delle tre geometrie utilizzate per la determinazione dell'estensione del modello secondo l'asse nord-sud

I risultati così ottenuti in ogni modello nei due scenari per lo *slice* 21 (ultimo strato alla profondità di 30 m dal piano campagna con andamento ad esso parallelo) sono riportati nel grafico nella Figura 4.10. Il grafico ha in ordinata il carico idraulico h ed in ascissa la distanza d tra la linea di costa e l'isolinea corrispondente al carico idraulico stesso.

L'andamento del carico piezometrico nelle due condizioni, per ogni modello, tende sempre a chiudersi secondo un andamento "ad ago". La distanza tra le due curve riferite ad uno stesso modello rappresenta l'attività di emungimento; infatti, in presenza di emungimento, a parità di carico idraulico le isolinee indietreggiano verso monte come conseguenza della captazione. Naturalmente, la zona in cui l'attività di emungimento si evidenzia maggiormente è quella compresa tra la linea di costa e i pozzi stessi (posti a 115 m dalla linea di costa).

La curva del carico idraulico con emungimento per il modello "ridotto" in prossimità dei pozzi si discosta maggiormente dagli altri due modelli che hanno invece un andamento simile almeno nella prima parte. Il modello più ridotto non riesce infatti a riprodurre la piezometria reale, cosa che avviene invece con gli altri due modelli che presentano risultati simili in prossimità della zona interessata dalla captazione a sud dei pozzi di emungimento.

In definitiva, a parità di attendibilità degli output, per questioni di costi computazionali si è scelto il secondo modello, cioè quello "medio" con estensione longitudinale totale pari a 1 065 m. La distanza di 650 m tra il bordo Sud del modello e la linea dei pozzi di emungimento risulta quindi il migliore compromesso individuato tra la corretta riproducibilità dei fenomeni da studiare e i tempi computazionali modesti.

Analisi dell'andamento del carico idraulico per la valutazione della dimensione del modello secondo l'asse nord - sud

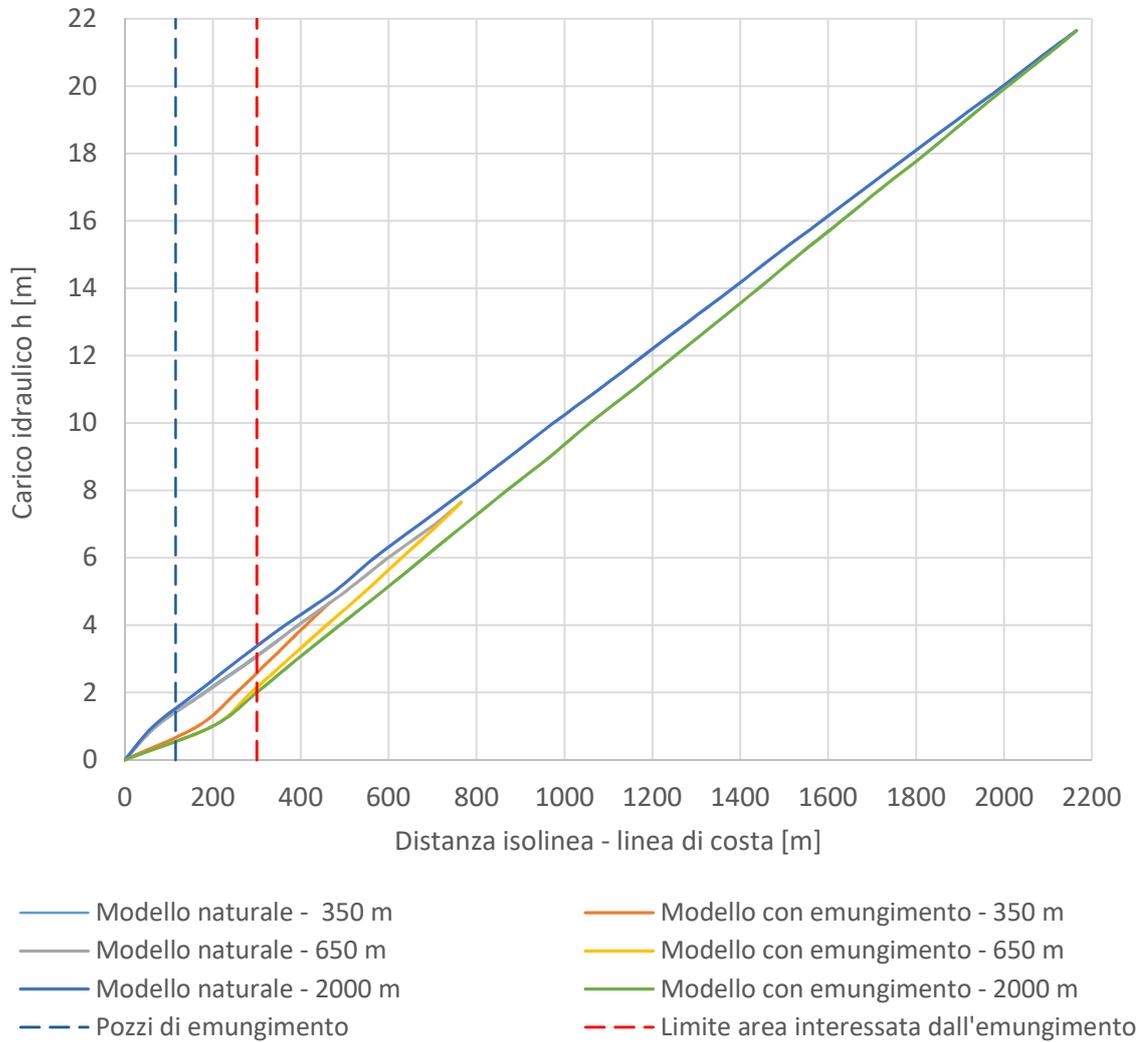


Figura 4.10 Andamento del carico idraulico alla profondità di 30 m da p.c. per la scelta dell'estensione del modello secondo l'asse nord – sud

Sintesi

Il Capitolo 4 è stato dedicato allo sviluppo del modello numerico costruito per lo studio dell'intrusione salina; le impostazioni e gli algoritmi risolutivi del software FEFLOW utilizzano il metodo agli elementi finiti presentato nel Capitolo 3.

Nel paragrafo 4.1 è stata descritta la geometria del modello. Data l'estensione e la complessità dell'area di studio, si è deciso di rappresentarne soltanto una porzione mediante lo sviluppo di un modello di dimensioni ridotte che riuscisse a simulare il fenomeno con i minimi costi computazionali. La geometria planimetrica del modello è stata assunta pari a 300 m per 1 065 m, rispettivamente secondo le direzioni est-ovest e nord-sud. In particolare, per la determinazione della dimensione nord-sud è stata effettuata un'accurata analisi riportata in dettaglio nel paragrafo 4.5. I pozzi di emungimento e di re-immissione sono stati disposti lungo linee parallele alla costa a una distanza dalla stessa rispettivamente di 115 m e 15 m. Per quanto riguarda l'altimetria, il sottosuolo è stato modellato fino alla profondità di 30 m coincidente con lo strato di argilla base dell'acquifero semiconfinato. La geometria della falda è stata definita utilizzando le misure piezometriche rilevate in prossimità dei pozzi, estendendo il gradiente idraulico così determinato fino al bordo sud.

Nel paragrafo 4.2 si è proceduto all'estrusione verticale della sezione planimetrica prima definita, al fine di creare una "gabbia" tridimensionale successivamente discretizzata in elementi finiti. La *mesh* così ottenuta è stata infittita in corrispondenza delle aree ritenute di interesse per una maggiore precisione dei risultati.

Nel paragrafo 4.3 sono state impostate le condizioni al contorno e iniziali (idrauliche e di salinità) indispensabili per la risoluzione dell'algoritmo agli elementi finiti. Il carico idraulico a monte è stato assunto pari a 7,65 m in alto piezometrico e a 4 m in basso piezometrico, valori derivati dai rispettivi gradienti idraulici. Per tenere conto della densità dell'acqua salata, la porzione di mare è stata simulata utilizzando il carico d'acqua dolce equivalente (paragrafo 3.3.4); è stata imposta inoltre una concentrazione di cloruri pari a 35 000 mg/l.

Nel paragrafo 4.4 sono state descritte le proprietà del terreno, con particolare riferimento alla conducibilità idraulica e al comportamento anisotropo del terreno rispetto alla stessa. Dalle prove idrauliche condotte in sito, la conducibilità idraulica è risultata dell'ordine di 10^{-4} m/s e 10^{-5} m/s rispettivamente nel piano xy e lungo la direzione z.

5 ELABORAZIONE DELLE SIMULAZIONI E ANALISI DEI RISULTATI

Premessa

Nel seguente capitolo si presentano le simulazioni condotte e i risultati ottenuti. Inizialmente, sono state eseguite simulazioni di flusso con i pozzi inattivi ai fini dello studio idraulico e della validazione del modello. Successivamente è stata attivata anche l'opzione di trasporto in falda simulando prima solo l'emungimento e dopo anche la re-immissione. Entrambe le elaborazioni sono state condotte in condizioni di alto e basso piezometrico in modo da monitorare l'intrusione salina durante l'intero anno; ciò per determinare un piano di gestione delle portate di emungimento e re-immissione per il controllo e la mitigazione del fenomeno.

La calibrazione del modello è risultata una fase delicata e complessa ma che alla fine ha permesso di verificare la rispondenza delle assunzioni iniziali tramite un processo di validazione. Nell'analisi numerica la fase di validazione prevede di simulare scenari noti al fine di verificare la corrispondenza degli output con i dati reali. Il modello così validato potrà essere utilizzato per la trattazione di condizioni più complesse. La procedura di validazione viene eseguita aggiungendo e/o modificando i vari input in differenti step, in modo da poterne valutare separatamente i conseguenti effetti; detta metodologia, seppur impegnativa, risulta indispensabile e consente di ottenere un modello attendibile.

Nel caso in esame, si è scelto di validare l'aspetto idraulico del modello ricostruendo l'andamento del carico piezometrico precedentemente rilevato in sito. Successivamente sono stati simulati gli scenari di emungimento e re-immissione, ipotizzando diverse portate per entrambe le condizioni di alto e basso piezometrico, con l'obiettivo di monitorare prima l'avanzamento del cuneo salino e valutare poi l'efficacia del barrieramento come soluzione al fenomeno

indesiderato. Ovviamente i risultati ottenuti sono stati interpretati con senso critico e in base all'esperienza, verificando in tal modo la congruenza tra gli output forniti dal modello e la realtà.

5.1 Analisi di flusso e validazione del modello

L'analisi di flusso è stata utilizzata per la validazione del modello, per verificare che le condizioni iniziali e al contorno, impostate secondo quanto detto nel paragrafo 4.3, riproducessero correttamente l'andamento del carico idraulico rilevato in sito. La simulazione di flusso ha permesso la ricostruzione della piezometria all'interno del dominio di calcolo in assenza di emungimento in condizioni di alto e basso piezometrico. Nella Figura 5.1 si riporta il passo temporale delle iterazioni con cui viene raggiunta la condizione di equilibrio.

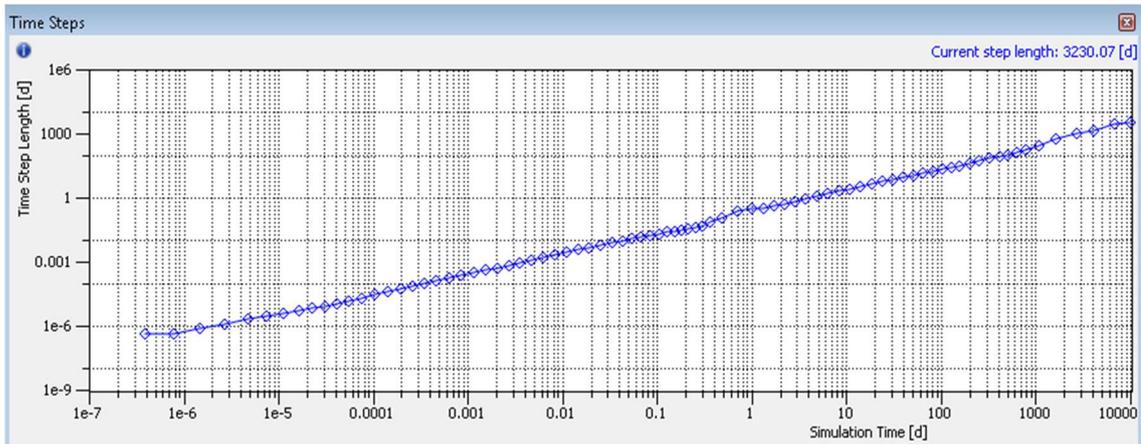


Figura 5.1 Passo temporale delle iterazioni con cui viene raggiunta la condizione di equilibrio per la riproduzione del carico piezometrico senza emungimento

Dai risultati ottenuti si evince che l'andamento del carico idraulico riprodotto è sufficientemente sovrapponibile ai valori misurati, come di seguito mostrato. Nella Figura 5.2 sono rappresentate le isolinee del carico idraulico in superficie e alla profondità di 30 m in condizioni di alto piezometrico. In questo caso sono state utilizzate le seguenti condizioni al contorno:

- Carico idraulico pari a 7,65 m sul bordo sud;
- Carico idraulico d'acqua dolce equivalente variabile in funzione dell'altezza della colonna d'acqua salata per tutti i nodi ricadenti nella porzione occupata dal mare.

Le isolinee restituiscono da calcolo un valore prossimo a 1 m nella zona dei pozzi di emungimento e pari a circa 0,25 m in corrispondenza dei pozzi di re-

immissione, mentre i dati reali risultano rispettivamente pari a 1 m e 0,2 m, con un gradiente idraulico dell'1% a sud dei pozzi di emungimento. Pertanto, quanto ottenuto dalla simulazione dimostra che il modello costruito risulta validato in condizioni di alto piezometrico. Analogo procedimento è stato svolto in basso piezometrico impostando il carico idraulico iniziale sui nodi del bordo sud a 4,00 m. In questo caso le isolinee restituiscono valori pari a 0,65 m e 0,15 m rispettivamente in prossimità dei pozzi di emungimento e della linea lungo cui sarà realizzata la batteria di re-immissione, mentre i dati reali sono uguali a 0,7 m e a 0,2 m. Quanto ottenuto conferma la bontà della validazione e quindi la calibrazione del modello.

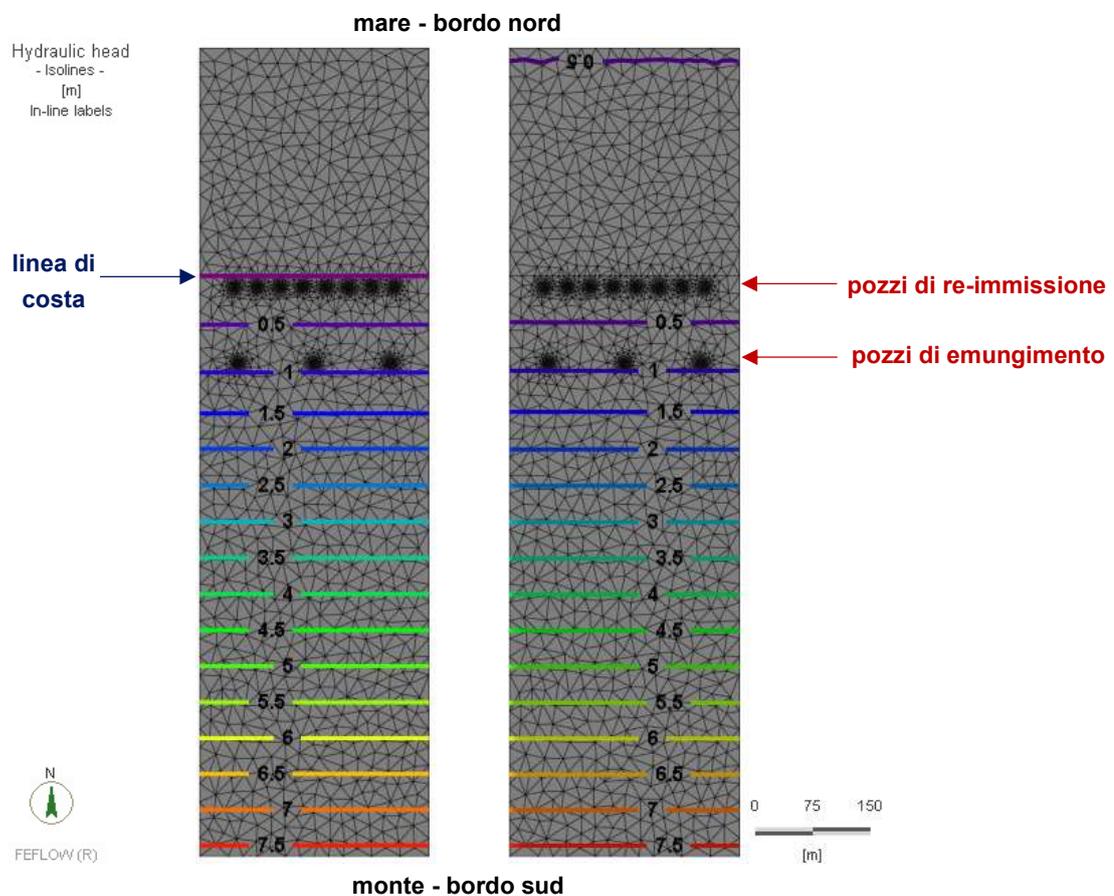


Figura 5.2 Ricostruzione dell'andamento del carico idraulico in alto piezometrico in condizioni naturali, in superficie (a sinistra) e alla profondità di 30 m (a destra)

Validato il modello, sono state eseguite le simulazioni di flusso attivando prima solo i pozzi di emungimento e successivamente anche quelli di re-immissione, per analizzare le variazioni dell'andamento del carico idraulico con diverse portate nelle condizioni di alto e basso piezometrico. Nella Figura 5.3 si riporta la piezometria negli *slice* di superficie e alla profondità di 30 m per una portata di emungimento di 60 m³/h per pozzo in alto piezometrico.

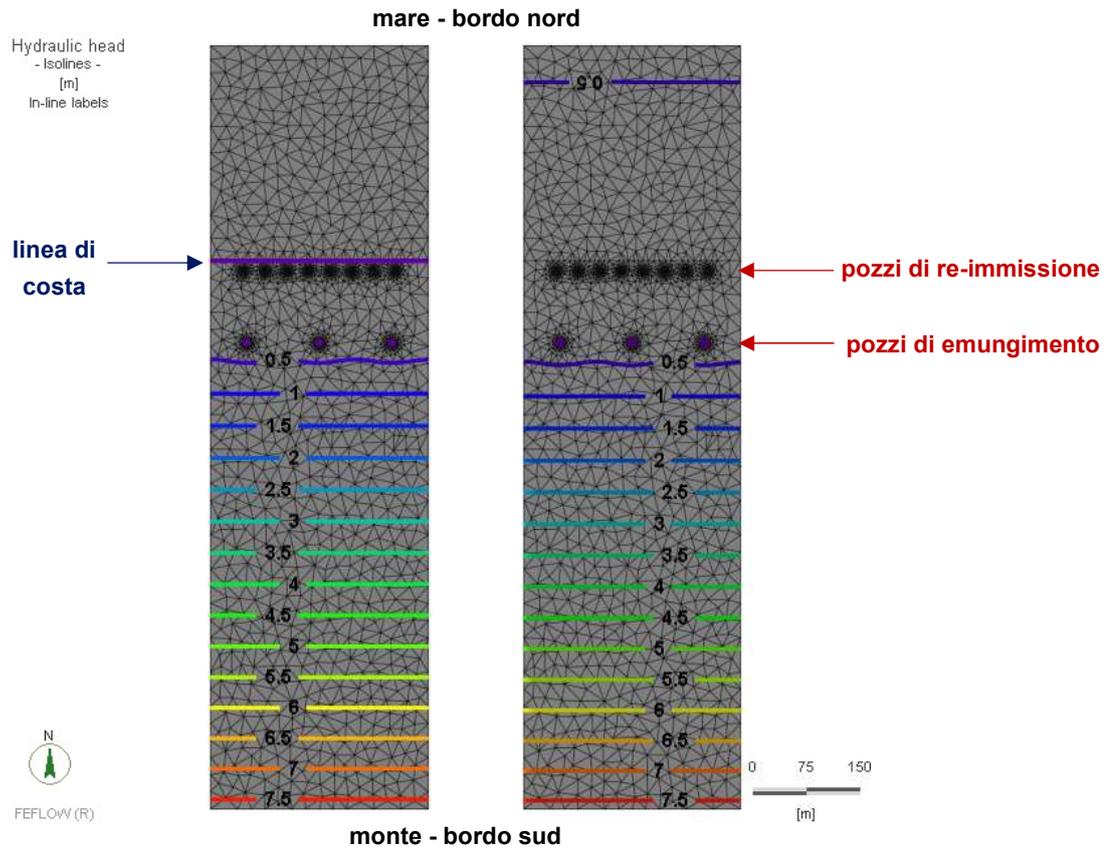


Figura 5.3 Andamento del carico idraulico in alto piezometrico con emungimento pari a $60 \text{ m}^3/\text{h}$ per ciascun pozzo, in superficie (a sinistra) e alla profondità di 30 m (a destra)

Risulta che, a parità di carico idraulico, in accordo con le aspettative, rispetto alla condizione con i pozzi inattivi le rispettive isolinee tendono a risalire verso monte. Infatti l'emungimento capta il flusso proveniente da monte e richiama da valle l'acqua della falda in prossimità della costa.

Il cono di emungimento così generato (come illustrato in precedenza nella Figura 2.6) determina in corrispondenza dei pozzi di emungimento un notevole abbassamento del livello piezometrico e nell'intorno degli stessi una generale depressione della falda che si smorza con la distanza.

Quanto appena detto è mostrato nella Figura 5.4 da cui si evince la discreta depressione della falda rispetto allo scenario con i pozzi inattivi. Nel caso di basso piezometrico, a parità di acqua prelevata, l'abbassamento del livello della falda risulta più consistente perché le condizioni iniziali dell'acquifero sono più depresse (Figura 5.5).

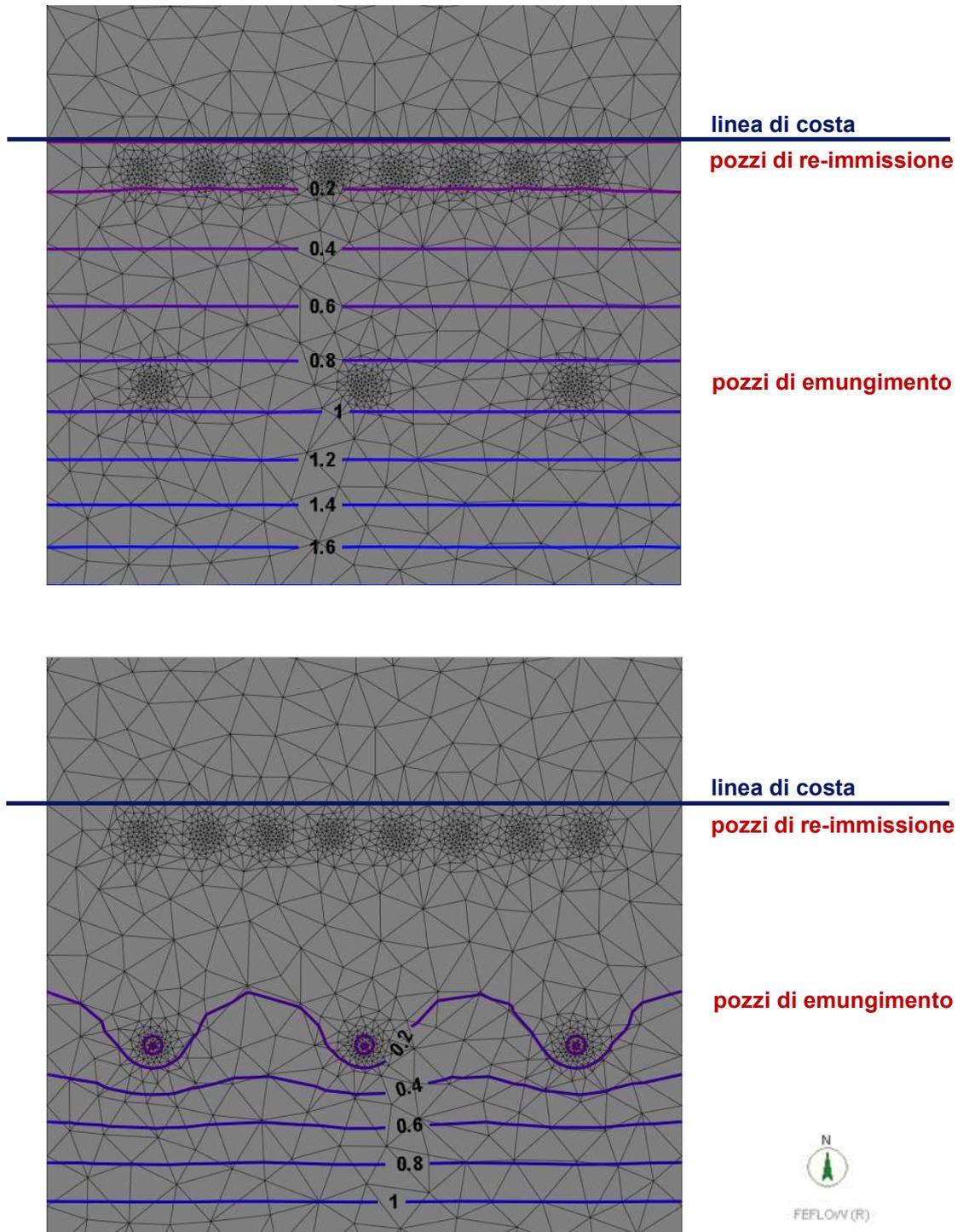


Figura 5.4 Confronto del carico idraulico in alto piezometrico in prossimità dei pozzi di emungimento in condizioni naturali (in alto) e con captazione di acqua per ciascun pozzo pari a $60 \text{ m}^3/\text{h}$ (in basso) – Sezione del modello alla profondità di 30 m

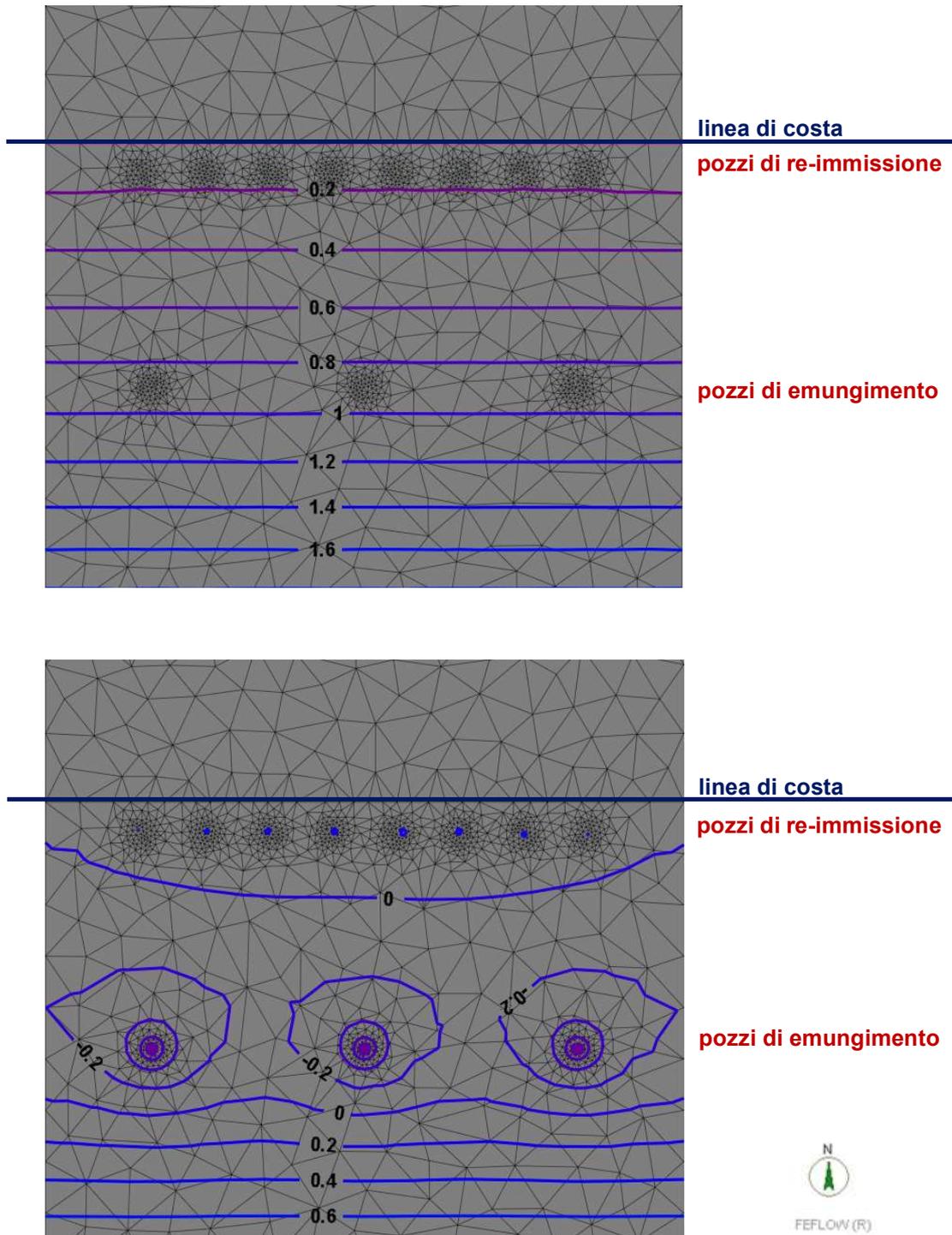


Figura 5.5 Confronto del carico idraulico in basso piezometrico in prossimità dei pozzi di emungimento in condizioni naturali (in alto) e con captazione di acqua per ciascun pozzo pari a $60 \text{ m}^3/\text{h}$ (in basso) – Sezione del modello alla profondità di 30 m

L'attività di emungimento in prossimità della linea di costa (con il conseguente abbassamento della falda) genera inevitabilmente l'avanzamento del cuneo salino, argomento centrale del lavoro di tesi e illustrato dettagliatamente nel paragrafo 2.1. L'acqua del mare, infatti, viene richiamata verso l'entroterra per ripristinare l'equilibrio idraulico del sistema; essa avanza nel sottosuolo e causa la conseguente contaminazione della falda e quindi dell'acqua emunta con cloruri.

Ciò provoca importanti danni ambientali e condiziona l'uso industriale dell'acqua emunta, in quanto la stessa deve avere un basso contenuto di cloruri. Infatti, all'interno della Raffineria, l'acqua viene utilizzata per il raffreddamento degli impianti, per la produzione di acqua demineralizzata per poi generare vapore da impiegare nel riscaldamento dei fluidi di processo e nella bonifica delle apparecchiature, per l'alimentazione del sistema antincendio e per usi civili.

Per questo motivo è necessario attuare delle azioni per eliminare/limitare l'effetto indesiderato dell'avanzamento del cuneo salino. Nel caso in esame, come già detto, la soluzione è stata individuata nella realizzazione di una batteria di pozzi di re-immissione che, gestita con portate adeguate, permette di ripristinare l'equilibrio del sistema idraulico e il livello dell'acquifero in prossimità della costa, contrastando il fenomeno dell'intrusione salina e garantendo al contempo la necessaria attività di emungimento. La verifica dell'efficacia di tale soluzione è uno degli obiettivi del lavoro di tesi. Pertanto sono state effettuate delle simulazioni nelle quali, oltre all'emungimento, è stata configurata anche l'attività di re-immissione mediante i rispettivi pozzi. Nella Figura 5.6 si riporta l'andamento delle isolinee in alto piezometrico nel caso in cui le portate di emungimento e di re-immissione siano rispettivamente pari a $60 \text{ m}^3/\text{h}$ e $15 \text{ m}^3/\text{h}$ per ciascun pozzo.

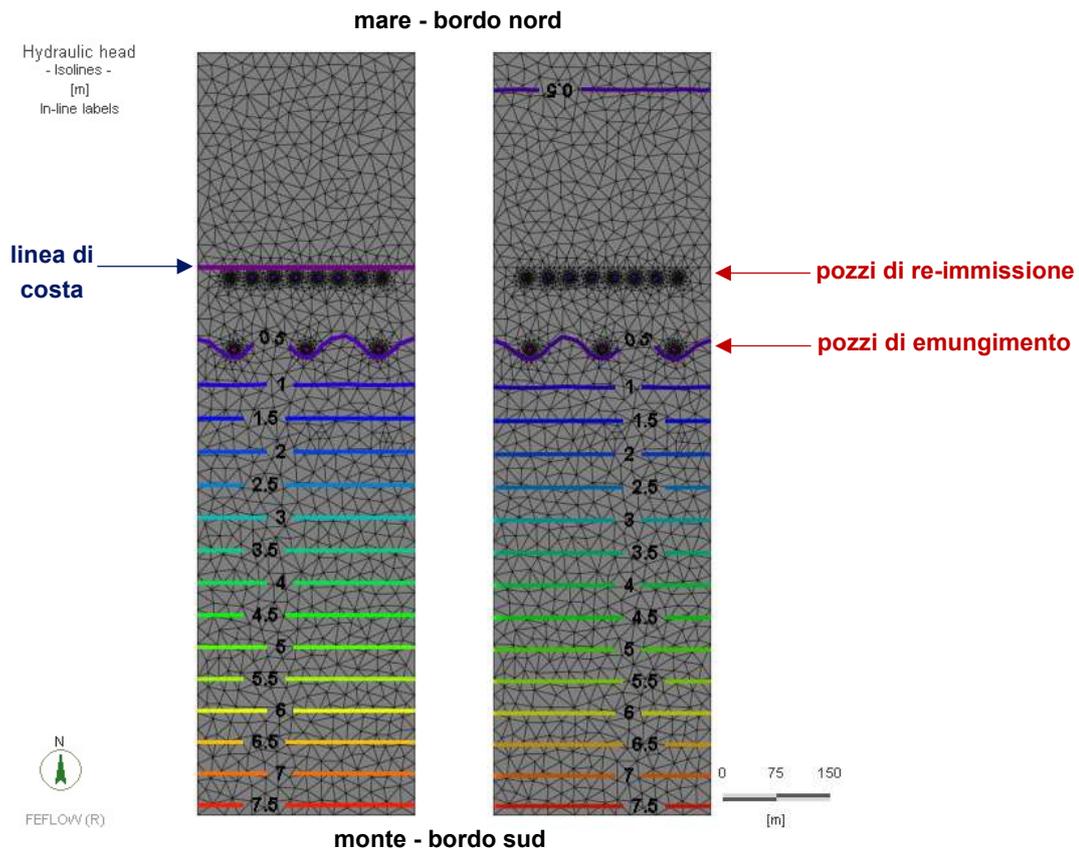


Figura 5.6 Andamento del carico idraulico in alto piezometrico con portate di emungimento e di re-immissione pari a $60 \text{ m}^3/\text{h}$ e a $15 \text{ m}^3/\text{h}$ per ciascun pozzo, in superficie (a sinistra) e alla profondità di 30 m (a destra)

Nelle Figure 5.7 e 5.8 si rappresenta l'andamento del carico idraulico nelle differenti situazioni sopra esposte in una fascia di circa 300 m dalla linea di costa. In particolare, dalla Figura 5.8 si evince come l'attività di re-immissione tende a ripristinare la piezometria iniziale pur in presenza di una cospicua attività di emungimento.

Nella Figura 5.7 il carico idraulico h (asse delle ordinate) è rappresentato in funzione della sua distanza dalla linea di costa verso il bordo sud del modello (asse delle ascisse). Le tre curve mostrano l'andamento delle isolinee h nelle condizioni iniziali (linea arancione), nel caso di emungimento (linea blu) e nel caso di emungimento e re-immissione (linea azzurra). Sul grafico la posizione dei pozzi di emungimento e di re-immissione è indicata in rosso e in verde. Le isolinee relative allo stesso carico idraulico in presenza di emungimento indietreggiano dalla linea di costa rispetto alla condizione naturale a causa della generale depressione della falda; la riduzione del carico idraulico risulta accentuata in prossimità dei pozzi di emungimento (punto di minimo nella curva

blu). Attivando la batteria di re-immissione, il carico idraulico, pur conservando lo stesso andamento rispetto al caso precedente, presenta, a parità di distanza dalla linea di costa, valori discretamente maggiori. Ciò evidenzia che la re-immissione mitiga l'effetto dell'emungimento tendendo a ripristinare il livello iniziale della falda.

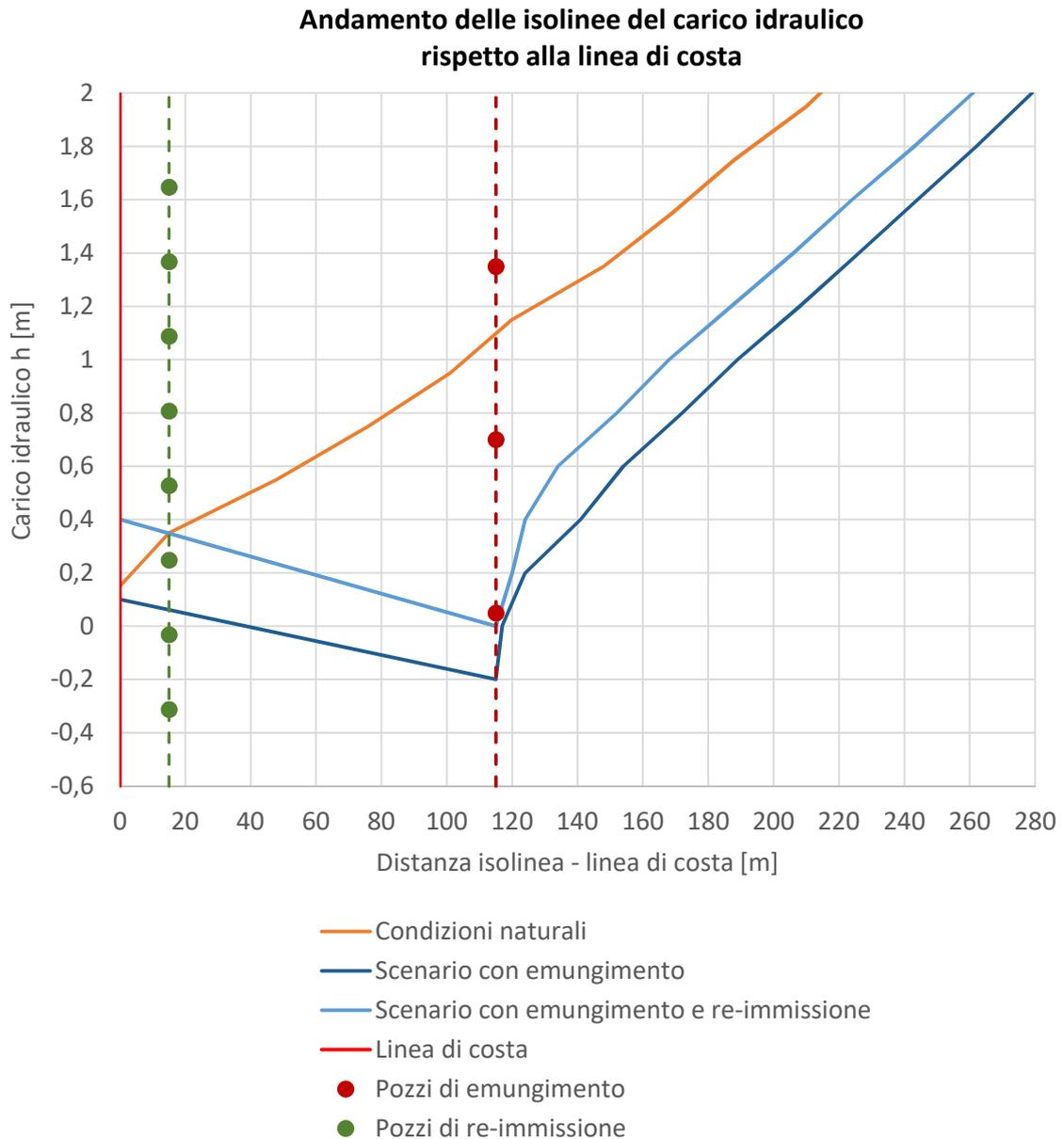


Figura 5.7 Andamento delle isolinee rispetto alla linea di costa verso monte in condizioni naturali, nel caso di solo emungimento e nel caso di emungimento e re-immissione, per visualizzare l'effetto del prelievo d'acqua e della successiva re-immissione

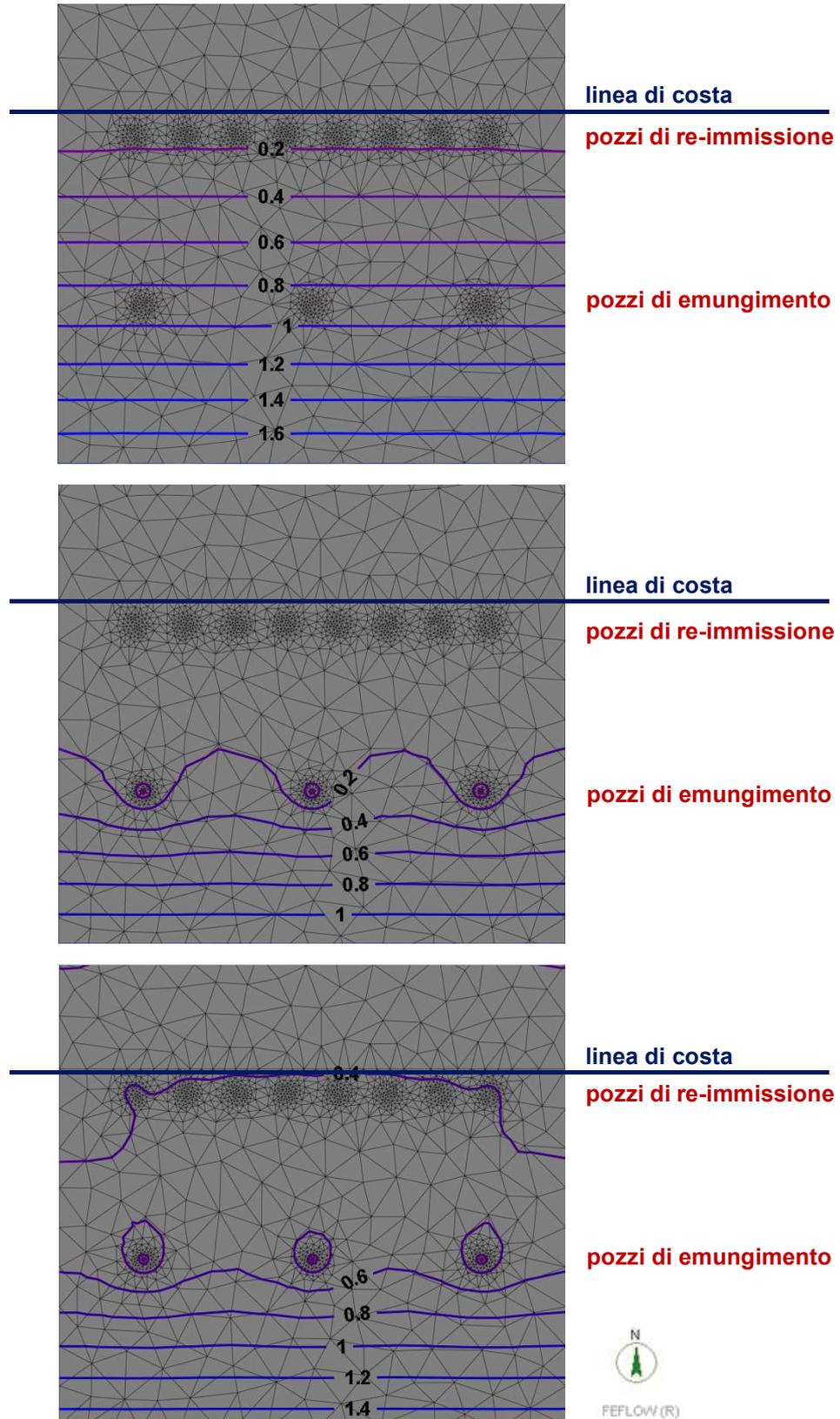


Figura 5.8 Confronto del carico idraulico in alto piezometrico in condizioni naturali (in alto), nel caso di emungimento pari a $60 \text{ m}^3/\text{h}$ per pozzo (in centro), nel caso di emungimento e re-immissione con portate rispettivamente pari a $60 \text{ m}^3/\text{h}$ e di $15 \text{ m}^3/\text{h}$ per pozzo (in basso) – Sezione del modello alla profondità di 30 m

5.2 Analisi dell'avanzamento del cuneo salino

Dopo lo studio idraulico del sistema si è proceduto all'analisi della distribuzione della salinità nell'acqua mediante il monitoraggio della concentrazione in falda dei cloruri, al fine di individuare i valori sostenibili delle portate di emungimento e garantire una buona qualità dell'acqua. Lo studio dell'avanzamento del cuneo salino da cui dipende la concentrazione di cloruri nell'acqua nel sottosuolo della Raffineria, infatti, è strettamente correlato con le attività di emungimento e di re-immissione.

In primo luogo si è proceduto all'individuazione del fronte salino in condizioni naturali, cioè senza che alcun pozzo fosse attivo. Il cuneo salino, in questo caso, assume un andamento tale per cui, in falda, il flusso d'acqua dolce in arrivo da monte supera abbondantemente la linea di costa; per tale motivo il contenuto di cloruri nella falda sottostante il sito industriale risulta bassissimo. Nella Figura 5.9 si riporta la distribuzione della concentrazione salina in superficie e alla profondità di 30 m in condizioni naturali in alto piezometrico, indicando con il colore rosso il massimo valore (35 000 mg/l) e in viola quello nullo. Per apprezzare maggiormente i risultati di output la *mesh* è stata infittita in corrispondenza dei pozzi e dell'interfaccia acqua dolce – acqua salata.

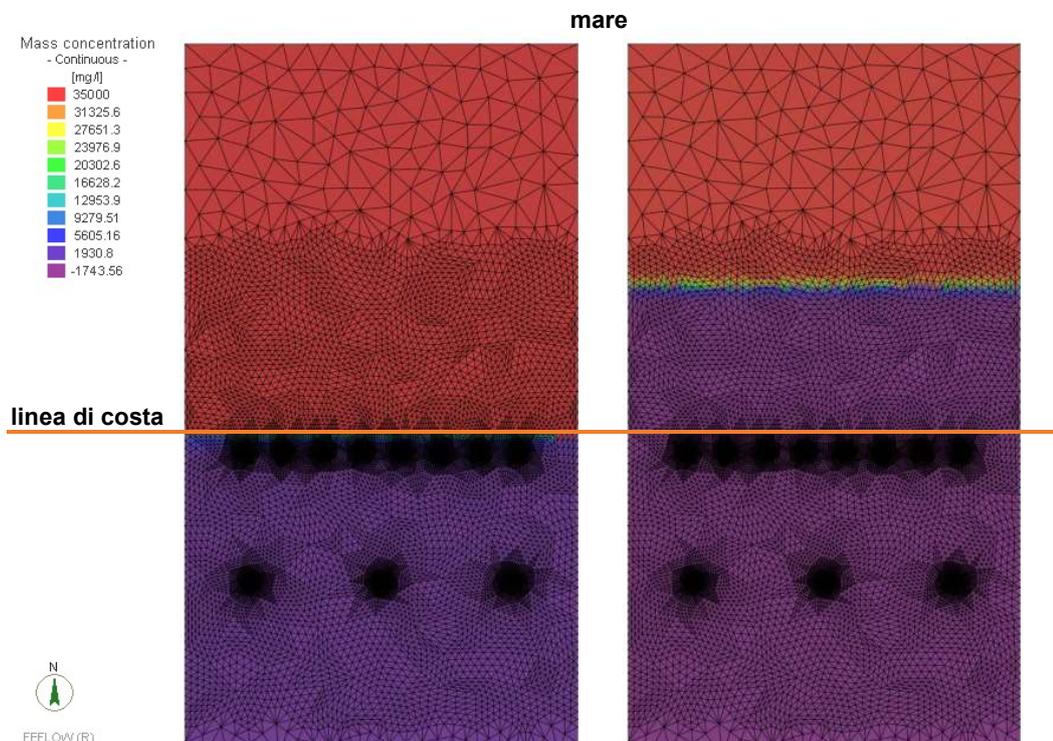


Figura 5.9 Distribuzione della concentrazione salina in alto piezometrico in condizioni naturali, in superficie (a sinistra) e alla profondità di 30 m (a destra)

Un particolare tridimensionale dell'avanzamento del fronte salino è rappresentato nella Figura 5.10.

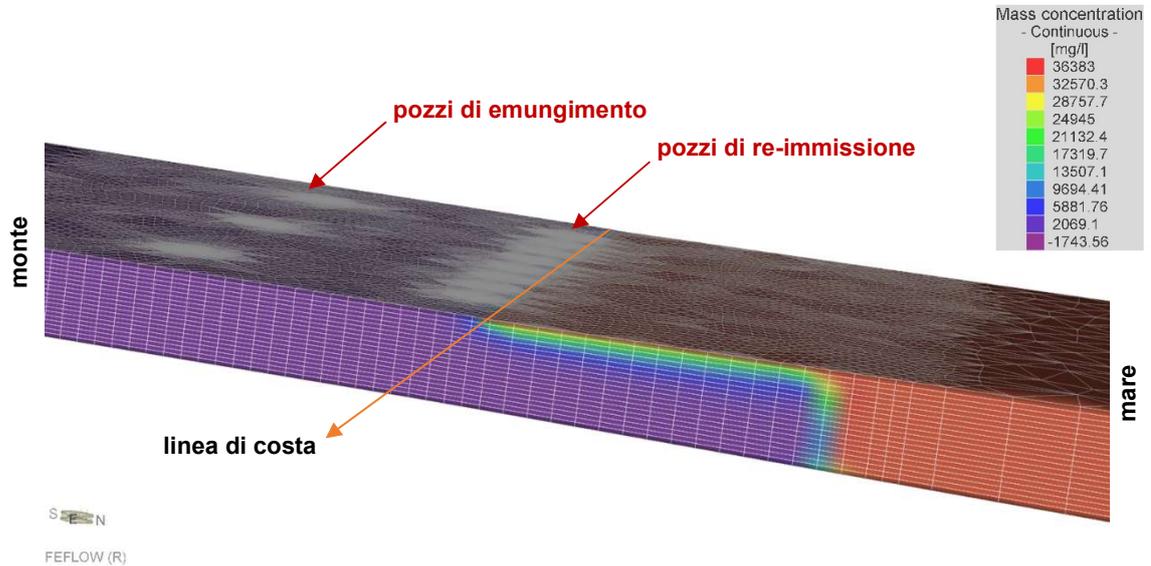


Figura 5.10 Particolare tridimensionale del cuneo salino in condizioni naturali senza emungimento in alto piezometrico

Come fatto anche per lo studio idraulico, si è proceduto quindi simulando l'attivazione dei pozzi di emungimento con diversi valori di portata. Ciò ha permesso, per ciascuna portata emunta, di individuare, sia in superficie che alla profondità di 30 m, la distanza del fronte salino (acqua con concentrazione di 3 000 mg/l di cloruri) rispetto alla linea di costa. Il valore di 3 000 mg/l di cloruri è stato assunto come soglia caratterizzante il fronte salino, in quanto si ritiene che concentrazioni superiori costituiscano un problema ambientale e impediscano l'uso industriale dell'acqua di falda.

Nella Figura 5.11 sono riportati i risultati della distribuzione di salinità ottenuti simulando una portata di emungimento di 40 m³/h per pozzo in condizioni di alto piezometrico. Nella Figura 5.12 si illustra, invece, ciò che risulta per una portata di captazione pari a 70 m³/h per pozzo, sempre in alto piezometrico.

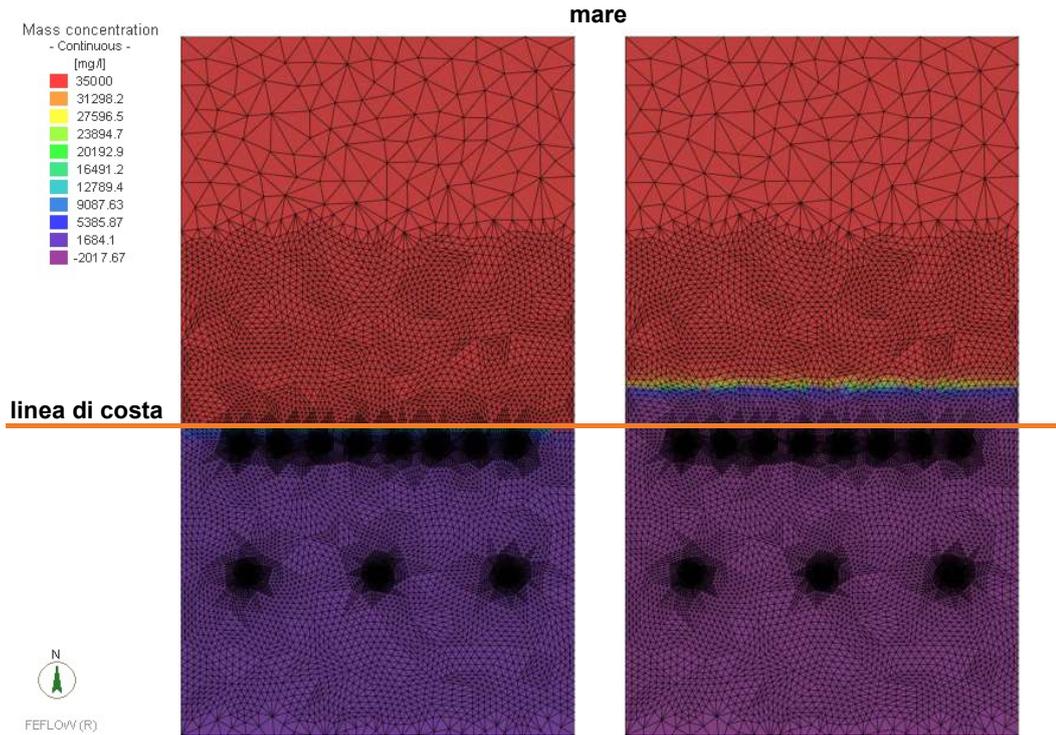


Figura 5.11 Distribuzione della concentrazione salina in alto piezometrico con emungimento pari a $40 \text{ m}^3/\text{h}$ per ciascun pozzo, in superficie (a sinistra) e alla profondità di 30 m (a destra)

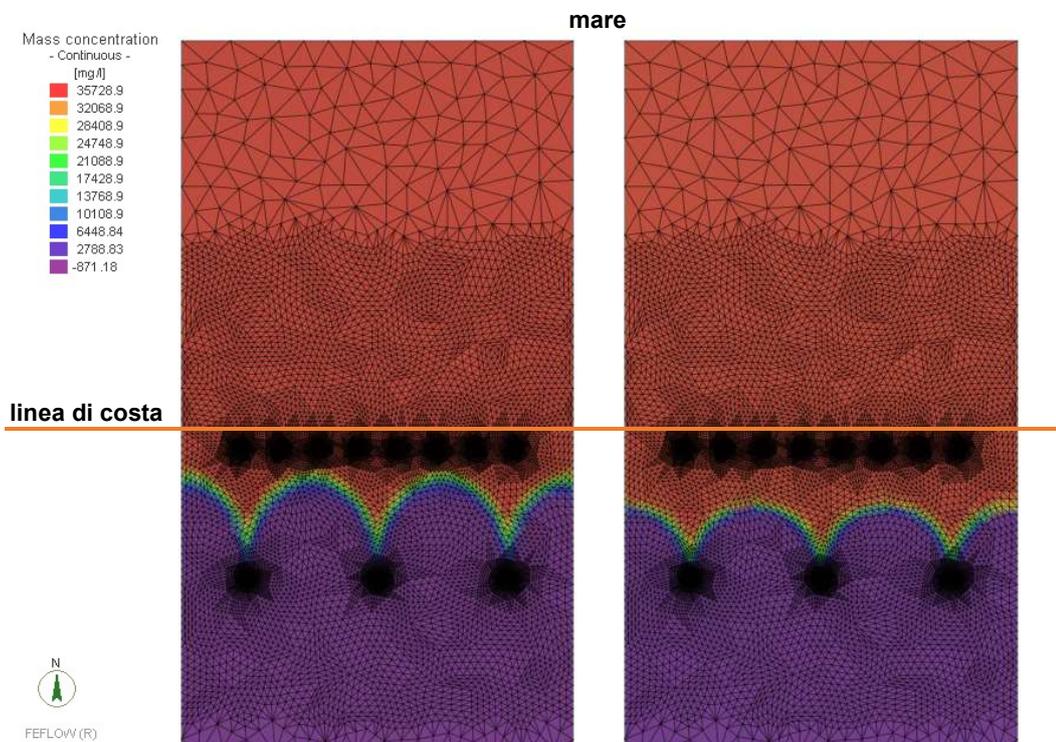


Figura 5.12 Distribuzione della concentrazione salina in alto piezometrico con emungimento pari a $70 \text{ m}^3/\text{h}$ per ciascun pozzo, in superficie (a sinistra) e alla profondità di 30 m (a destra)

Dalle Figure 5.11 e 5.12 è evidente come, incrementando l'emungimento, il cuneo salino avanzi nel sottosuolo dell'entroterra con un fronte sempre più verticale nella profondità e una zona di transizione via via più netta, giungendo anche in prossimità dei pozzi di emungimento (posti a 115 m dalla linea di costa). Visto che il fenomeno dell'intrusione salina è generato e via via accentuato dall'emungimento, è stata ritenuta necessaria, per contrastarlo, la realizzazione di un sistema che, in qualche modo, ripristinasse l'equilibrio idraulico iniziale. Dando seguito a questo ragionamento, come prima detto, è stata progettata una barriera di re-immissione in falda.

Si sono pertanto effettuate una serie di simulazioni prevedendo la contestuale attività di emungimento e di re-immissione e variandone, di volta in volta, le rispettive portate. Nella Figura 5.13 si riporta la distribuzione di concentrazione salina in alto piezometrico, sia in superficie che alla profondità di 30 m, nel caso in cui si prelevi 70 m³/h e si reimmetta 1 m³/h da ciascun pozzo.

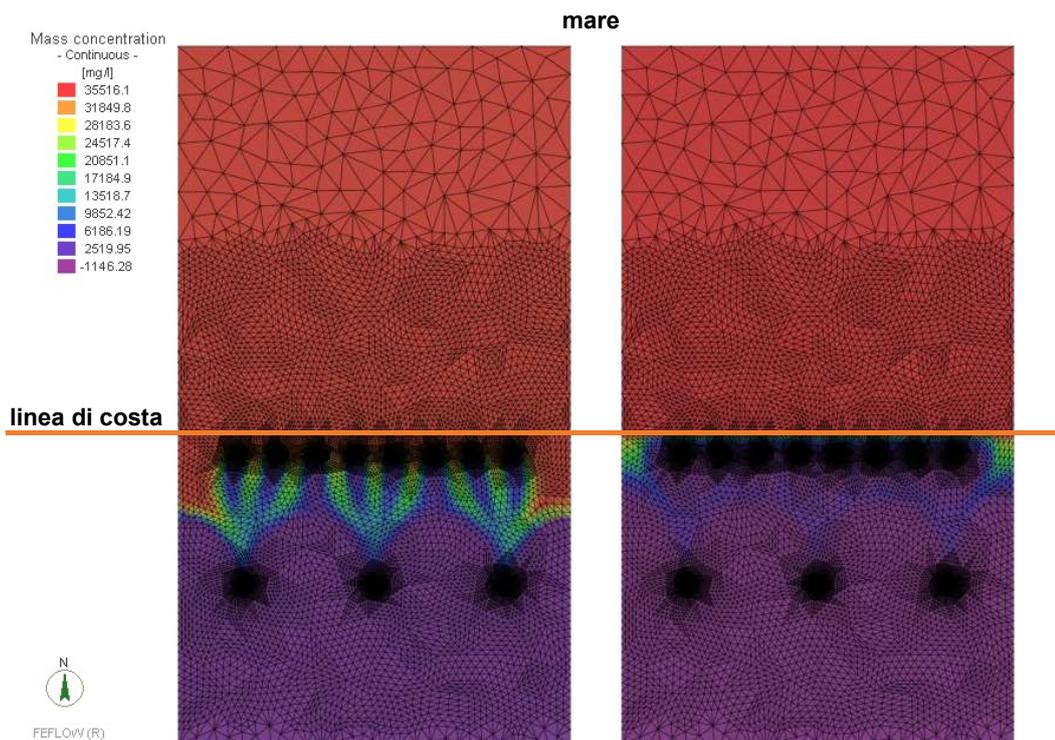


Figura 5.13 Distribuzione della concentrazione salina in alto piezometrico con emungimento e re-immissione pari rispettivamente a 70 m³/h e 1 m³/h per ciascun pozzo, in superficie (a sinistra) e alla profondità di 30 m (a destra)

Dalla Figura 5.13 si evince come l'attivazione della re-immissione, seppur con portate minime, modifica positivamente l'andamento del cuneo salino facendolo regredire: l'acqua dolce re-immessa, infatti, tende a contrastare il flusso d'acqua

salata richiamato verso l'entroterra dall'attività di emungimento. Tale fenomeno è meglio rappresentato nella parte centrale del modello, in quanto nelle zone laterali in prossimità della costa si risente degli effetti di bordo del modello dovuti alla limitazione geometrica dello stesso.

Continuando lo studio del fenomeno, a parità di portata di emungimento ($70 \text{ m}^3/\text{h}$ per ciascun pozzo) è stata aumentata la portata re-immessa fino a $5 \text{ m}^3/\text{h}$ per ciascun pozzo. In questo caso la regressione del cuneo salino è più evidente, soprattutto in profondità, come si evince dalla Figura 5.14: il fronte acqua dolce – acqua salata si porta nuovamente oltre la linea di costa, eliminando pertanto il fenomeno indesiderato della presenza di cloruri nel sottosuolo della Raffineria.

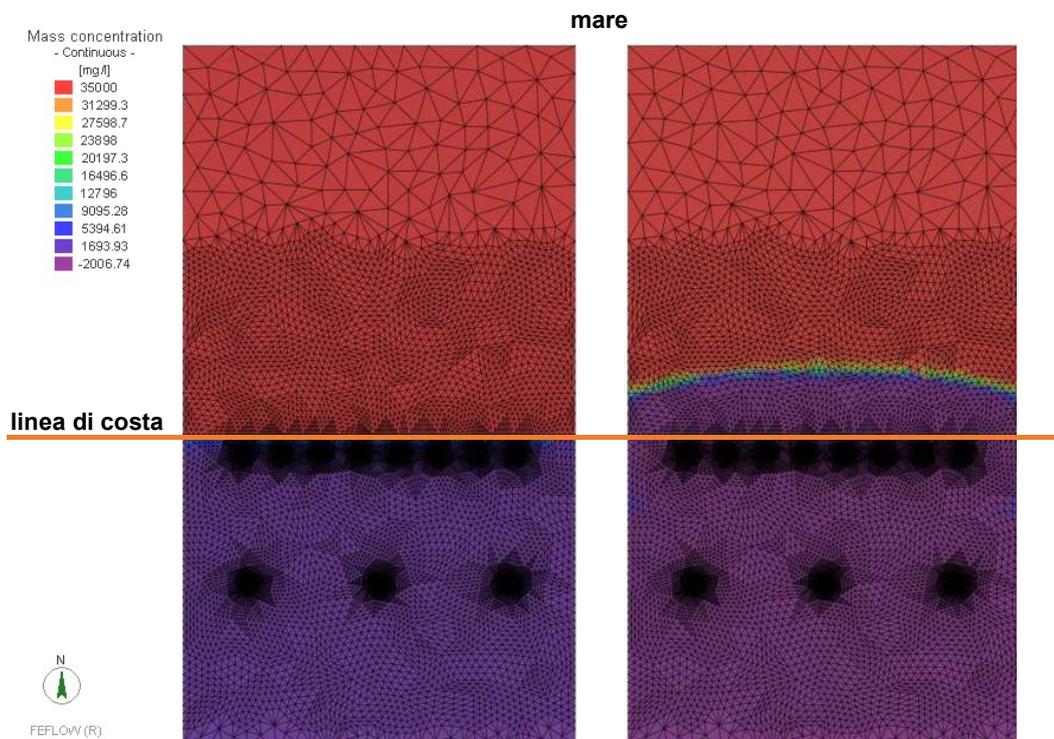
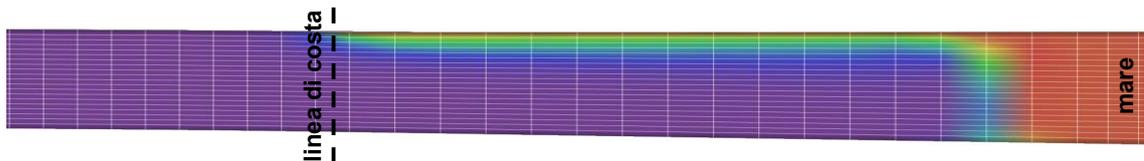


Figura 5.14 Distribuzione della concentrazione salina in alto piezometrico con emungimento e re-immissione pari rispettivamente a $70 \text{ m}^3/\text{h}$ e $5 \text{ m}^3/\text{h}$ per ciascun pozzo, in superficie (a sinistra) e alla profondità di 30 m (a destra)

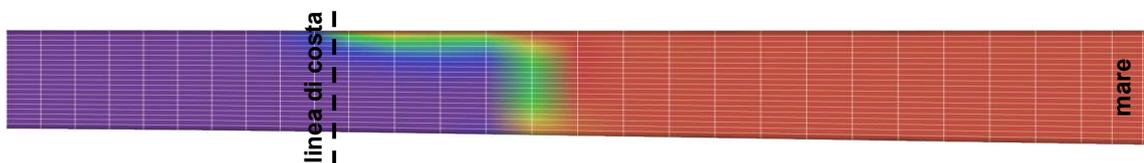
Gli scenari sopra descritti sono riassunti nella Figura 5.15 in cui si rappresentano con sezioni verticali gli andamenti del cuneo salino rispetto alla linea di costa (linea tratteggiata in nero), in modo da consentire un confronto immediato tra le diverse configurazioni. Ricapitolando quanto detto, in condizioni naturali il flusso d'acqua dolce in arrivo da monte oltrepassa la linea di costa e si porta all'equilibrio con l'acqua del mare (1). Con l'attivazione dell'emungimento si genera l'avanzamento del cuneo salino che, a causa della depressione della

falda, è richiamato verso l'entroterra (2); l'entità dell'avanzamento è più evidente all'aumentare dell'emungimento, giungendo ai pozzi di captazione alla portata di $70 \text{ m}^3/\text{h}$ (3). La successiva attivazione della batteria di re-immissione, con portate adeguate, tende a ripristinare l'equilibrio idraulico "spingendo" il fronte salino oltre la linea di costa (5).

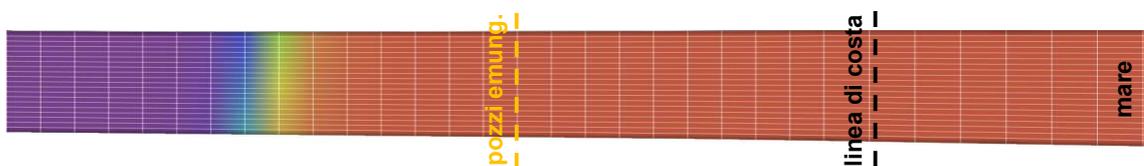
1. Condizione naturale senza emungimento



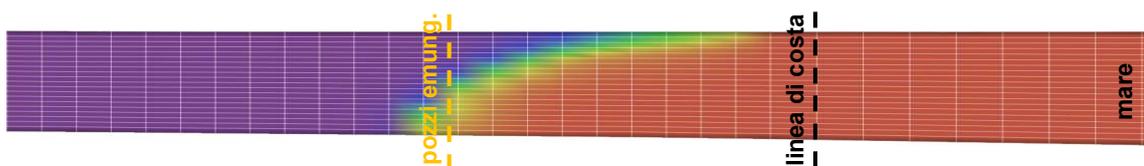
2. Emungimento pari a $60 \text{ m}^3/\text{h}$ per pozzo



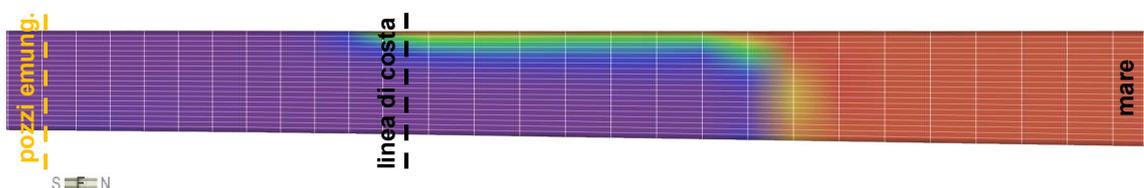
3. Emungimento pari a $70 \text{ m}^3/\text{h}$ per pozzo



4. Emungimento pari a $70 \text{ m}^3/\text{h}$ per pozzo, re-immissione pari a $1 \text{ m}^3/\text{h}$ per pozzo



5. Emungimento pari a $70 \text{ m}^3/\text{h}$ per pozzo, re-immissione pari a $5 \text{ m}^3/\text{h}$ per pozzo



S E N
FEFLOW (R)

Figura 5.15 Avanzamento del cuneo salino rispetto alla linea di costa in differenti scenari (linea tratteggiata), rappresentazione della fascia di mescolamento acqua dolce-acqua salata

5.3 Determinazione delle portate e piano di gestione

In precedenza sono stati commentati e riportati graficamente i risultati di alcune simulazioni condotte per portate di emungimento e di re-immissione predefinite, in modo da valutare qualitativamente il fenomeno dell'intrusione salina. Adesso, invece, si vuole effettuare un'analisi puntuale e quantitativa per determinare la posizione del fronte salino in funzione di tutte le portate di emungimento e re-immissione simulate. Si riportano di seguito i grafici così costruiti sia per le condizioni di alto che di basso piezometrico, in modo da:

- Studiare l'intrusione salina in funzione dell'attività di emungimento;
- Individuare, per ogni portata di emungimento ipotizzata, la portata di re-immissione sufficiente a contrastare l'avanzamento del cuneo salino;
- Individuare un piano di esercizio delle portate di emungimento e di re-immissione.

Nelle Figure 5.16 e 5.17 è mostrato l'andamento del cuneo salino quando vi è esclusivamente attività di emungimento, rispettivamente nelle condizioni di alto e basso piezometrico. In ordinata sono rappresentate le portate di emungimento per ciascun pozzo, in ascissa le distanze dell'interfaccia acqua dolce – acqua salata dalla linea di costa, sia in superficie (linea azzurra) che alla profondità di 30 m dal piano campagna (linea arancione); le distanze sono state assunte positive lato terra. La concentrazione di 3 000 mg/l di cloruri è stata scelta come valore discriminante della posizione del fronte salino. Detta concentrazione è stata letta sempre lungo l'asse del modello per evitare imprecisioni dovute agli effetti di bordo. La portata di emungimento simulata è stata spinta fino a 120 m³/h per ciascun pozzo, valore mediamente superiore al doppio di quello normalmente utilizzato nel sito; portate maggiori sarebbero risultate eccessivamente elevate e prive di significato.

Dai grafici riportati nelle Figure 5.16 e 5.17 si può determinare la portata critica di emungimento per ciascun pozzo oltre la quale il cuneo salino avanza nell'entroterra. In particolare, in corrispondenza di questo valore, il cuneo salino in superficie oltrepassa i pozzi di re-immissione e in profondità si avvicina repentinamente alla linea di costa. In alto piezometrico la portata critica risulta pari a 60 m³/h, mentre in basso piezometrico è di 20 m³/h. La significativa differenza della portata critica tra la condizione di alto e basso piezometrico è dovuta alla discreta riduzione del livello dell'acquifero nei mesi seguenti il periodo estivo, periodo caratterizzato da scarsissime precipitazioni.

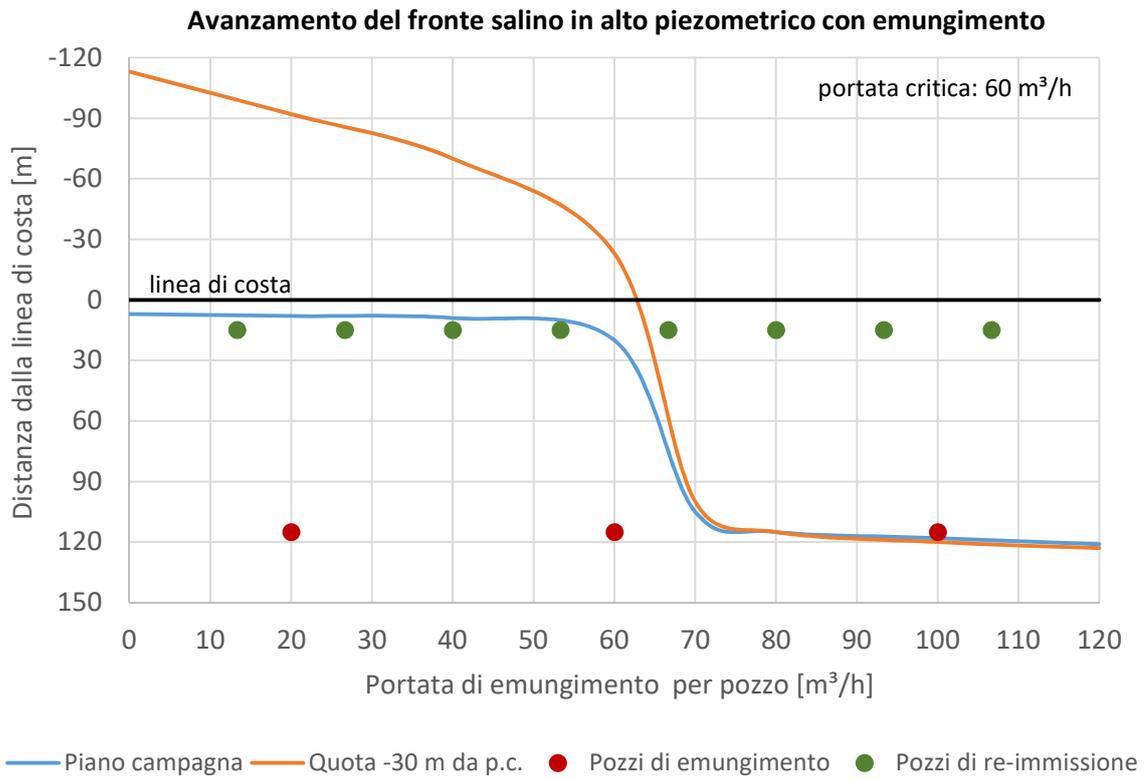


Figura 5.16 Avanzamento del cuneo salino con attività di emungimento in alto piezometrico

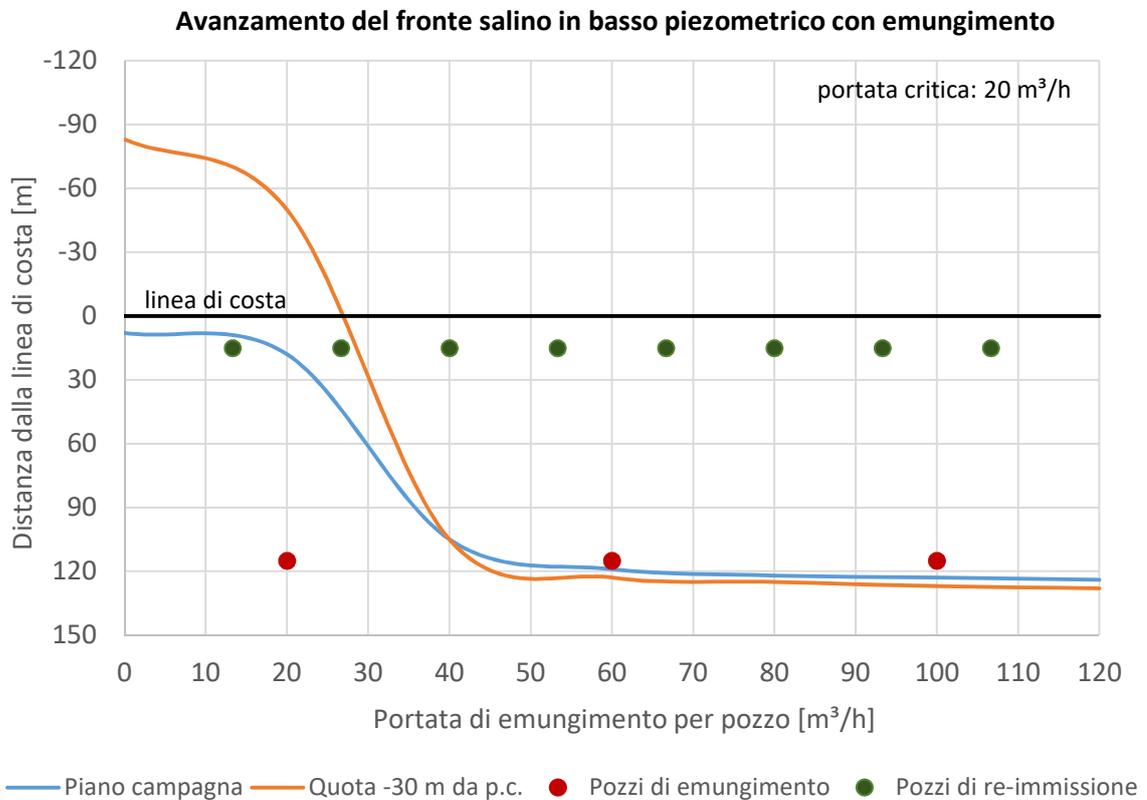


Figura 5.17 Avanzamento del cuneo salino con attività di emungimento in basso piezometrico

Dalle Figure 5.16 e 5.17 si evince che, sia nella condizione di alto che di basso piezometrico, le curve del fronte salino relative allo strato di superficie e alla profondità di -30 m dal piano campagna hanno un andamento discretamente differente per portate inferiori a quella critica; invece, per portate maggiori risultano sovrapponibili raggiungendo asintoticamente l'asse in corrispondenza dei pozzi di emungimento. Ciò significa che, per portate inferiori a quella critica, la superficie di transizione assume una forma semiparabolica nel senso del flusso, poiché la distanza tra le due curve rappresenta l'estensione in orizzontale del fronte salino (Figura 5.15 n°2). Per portate superiori, invece, la superficie d'interfaccia ha un andamento quasi verticale e quindi un'estensione orizzontale ridotta (Figura 5.15 n°3).

Individuati i valori critici delle portate di emungimento oltre cui si attiva l'avanzamento del cuneo salino, si è deciso di studiare l'effetto della re-immissione a partire da tali valori per verificarne l'efficacia. Per entrambe le condizioni di alto e basso piezometrico e per tutti gli scenari di emungimento, le portate di re-immissione per ciascun pozzo sono state quindi modulate incrementandole via via, in modo da ottenere l'arretramento del cuneo salino sia in superficie che in profondità.

In particolare è stata ritenuta accettabile la portata di re-immissione idonea a garantire che l'interfaccia acqua dolce – acqua salata si mantenesse in superficie oltre la linea della batteria di re-immissione e in profondità oltre la linea di costa. Le portate di re-immissione così determinate sono riportate nelle Figure 5.18, 5.19, 5.20 e 5.21, per dimostrare che la posizione del fronte salino, per tutte le portate di emungimento prese in esame, è accettabile sia in superficie che in profondità in condizioni di alto e basso piezometrico. Infatti, in ogni grafico di cui alle Figure 5.18, 5.19, 5.20 e 5.21 è stata rappresentata la posizione del fronte salino senza e con re-immissione; la curva relativa a quest'ultimo caso ricade sempre oltre la barriera di re-immissione lato mare, confermando l'efficacia dell'attività di re-immissione.

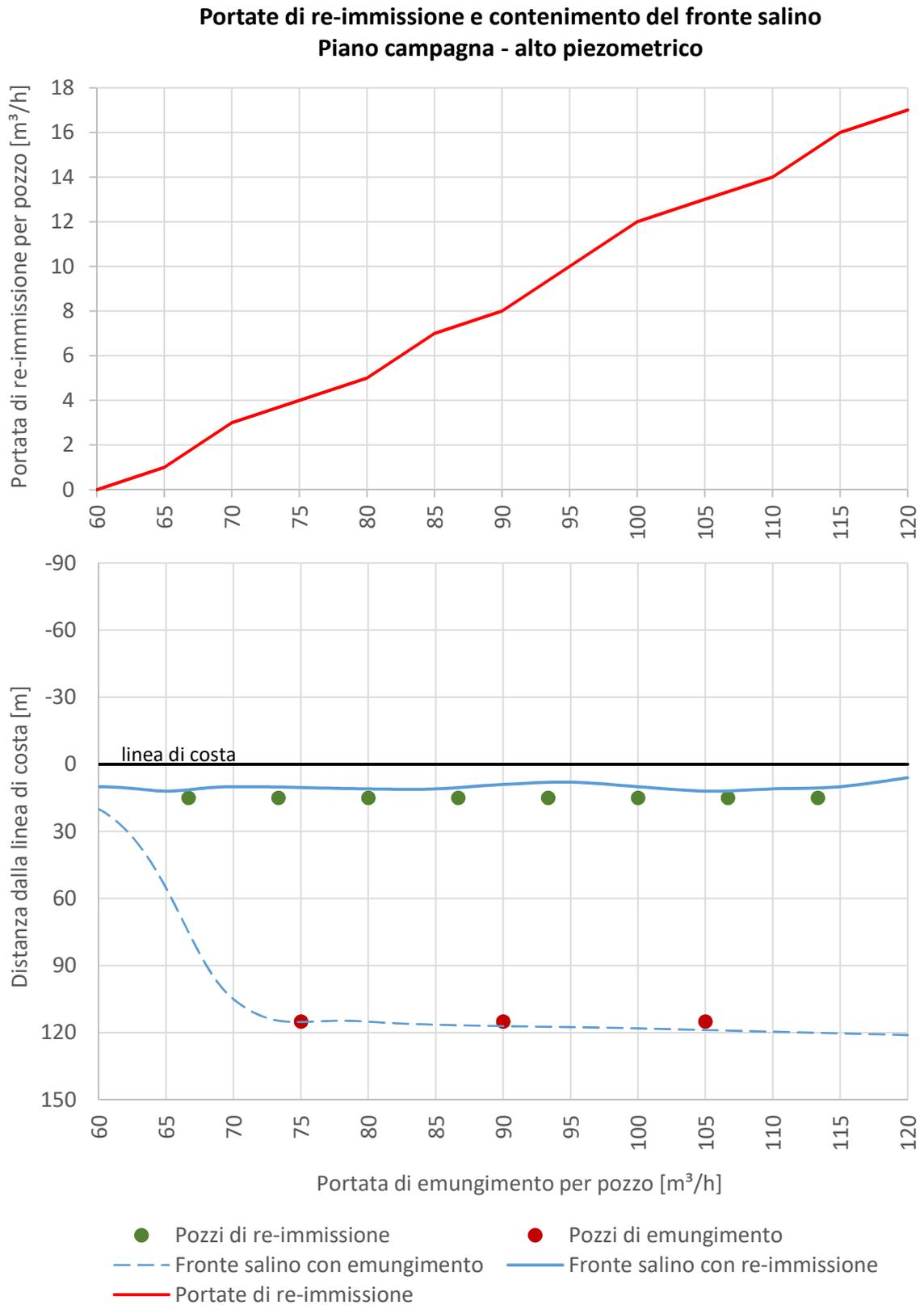


Figura 5.18 Portate di re-immissione per contrastare l'intrusione salina in funzione dell'emungimento, distanza del fronte salino dalla linea di costa solo con emungimento e con emungimento e re-immissione – Piano campagna, alto piezometrico

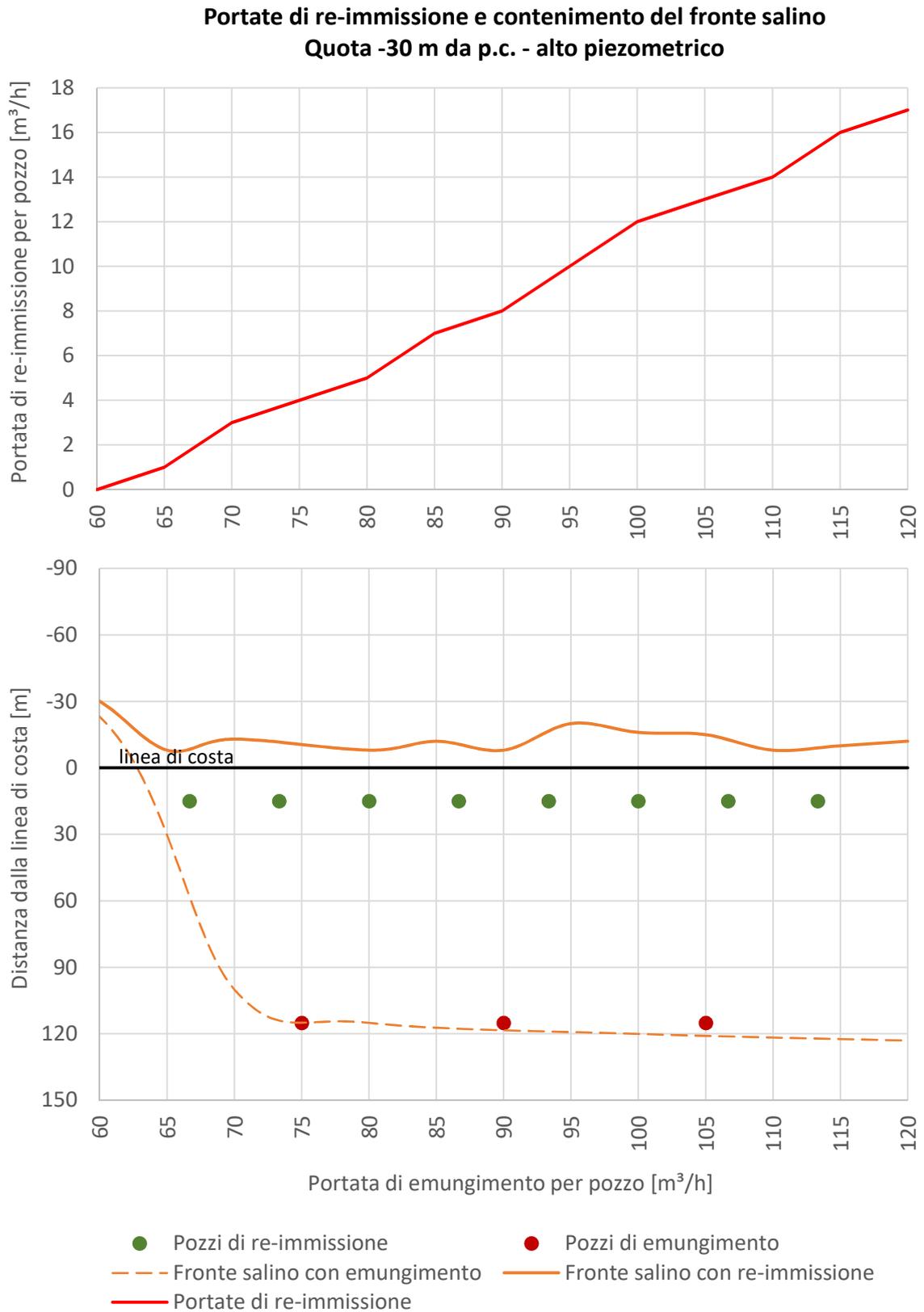


Figura 5.19 Portate di re-immissione per contrastare l'intrusione salina in funzione dell'emungimento, distanza del fronte salino dalla linea di costa solo con emungimento e con emungimento e re-immissione – Quota -30 m da piano campagna, alto piezometrico

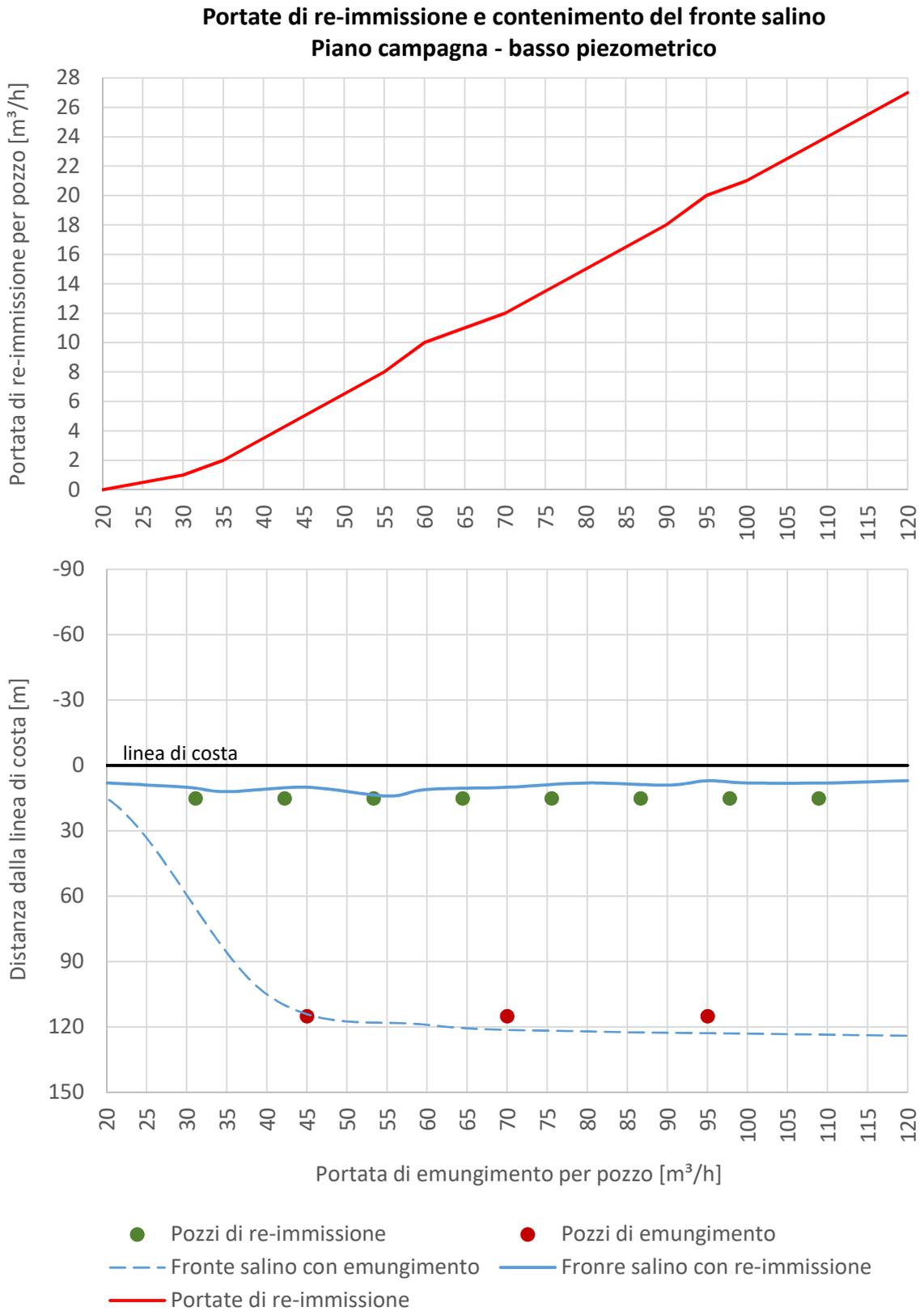


Figura 5.20 Portate di re-immissione per contrastare l'intrusione salina in funzione dell'emungimento, distanza del fronte salino dalla linea di costa solo con emungimento e con emungimento e re-immissione – Piano campagna, basso piezometrico

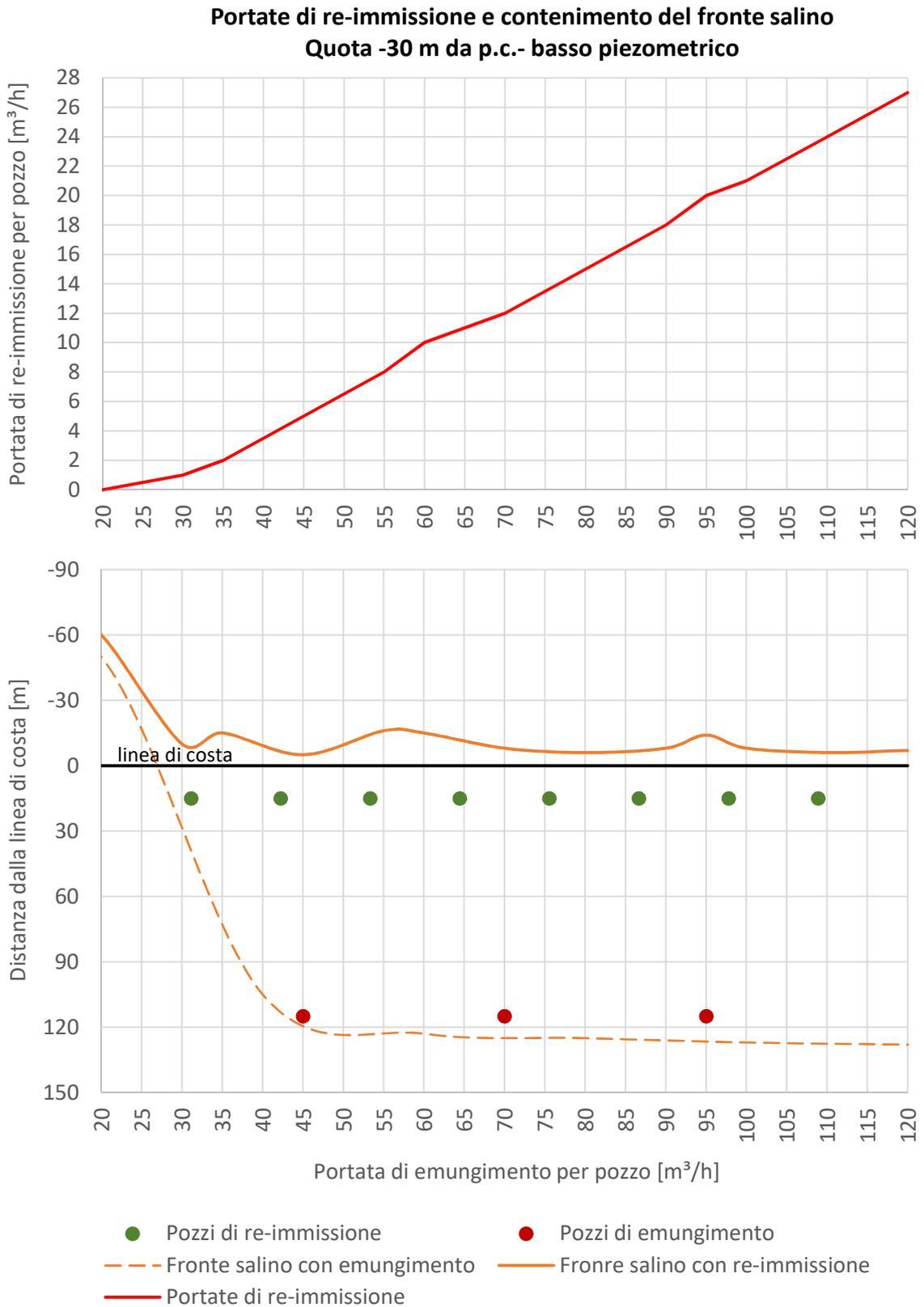


Figura 5.21 Portate di re-immissione per contrastare l'intrusione salina relative alle portate di emungimento, distanza del fronte salino dalla linea di costa solo con emungimento e con emungimento e re-immissione – Quota -30 m da piano campagna, basso piezometrico

Dai grafici riportati nelle Figure 5.18, 5.19, 5.20 e 5.21 si desume che, per contrastare efficacemente l'intrusione salina, a portate di emungimento maggiori devono corrispondere portate di re-immissione maggiori. Infatti, è intuibile che emungimenti consistenti causino depressioni più spinte della falda e, pertanto, necessitino di portate di re-immissione più elevate per ripristinare l'equilibrio idraulico. Dai grafici si evince inoltre che, a parità di emungimento, in condizione di basso piezometrico, considerando il livello iniziale più basso dell'acquifero, è necessaria una portata di re-immissione maggiore.

L'andamento continuo della curva che rappresenta le portate di re-immissione in funzione delle portate di emungimento è certamente di difficile applicazione nell'esercizio reale del sistema idraulico. Ciò perché richiederebbe l'impostazione di una portata di re-immissione per ciascuna portata di emungimento. Per superare questa difficoltà, la curva continua delle portate di re-immissione è stata discretizzata a gradini, in modo da individuare, per ogni intervallo di portate di emungimento, un valore di re-immissione costante e coincidente con il valore maggiore dell'intervallo stesso. In tal modo risulta più semplice gestire operativamente l'attività di re-immissione garantendo sempre portate adeguate. Quanto detto è riportato nelle Figure 5.22 e 5.23, rispettivamente per le condizioni di alto e basso piezometrico.

Nella Figura 5.24, invece, le portate di re-immissione nelle condizioni di alto e basso piezometrico sono messe a confronto, in modo da evidenziare che, a parità di emungimento, nella condizione di alto piezometrico sono necessarie portate di re-immissione minori; ciò perché il livello della falda è più alto e il fenomeno di avanzamento del cuneo salino, a seguito di emungimento, meno evidente.

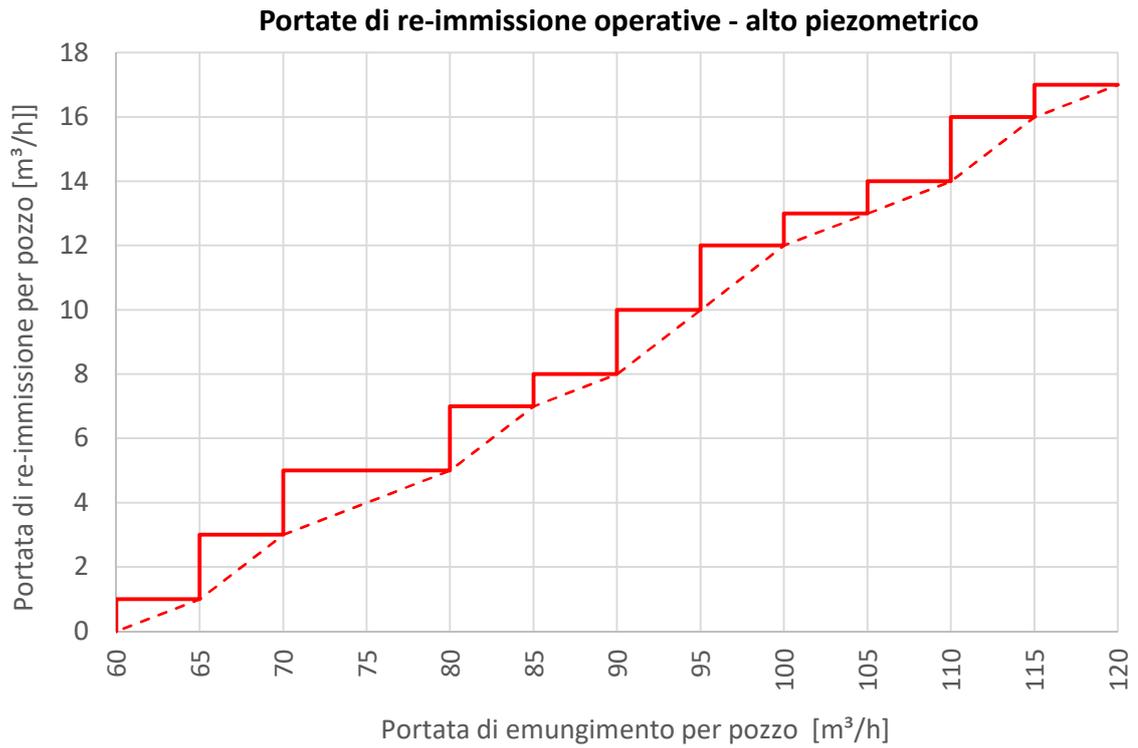


Figura 5.22 Piano operativo delle portate di re-immissione in relazione a quelle di emungimento – alto piezometrico

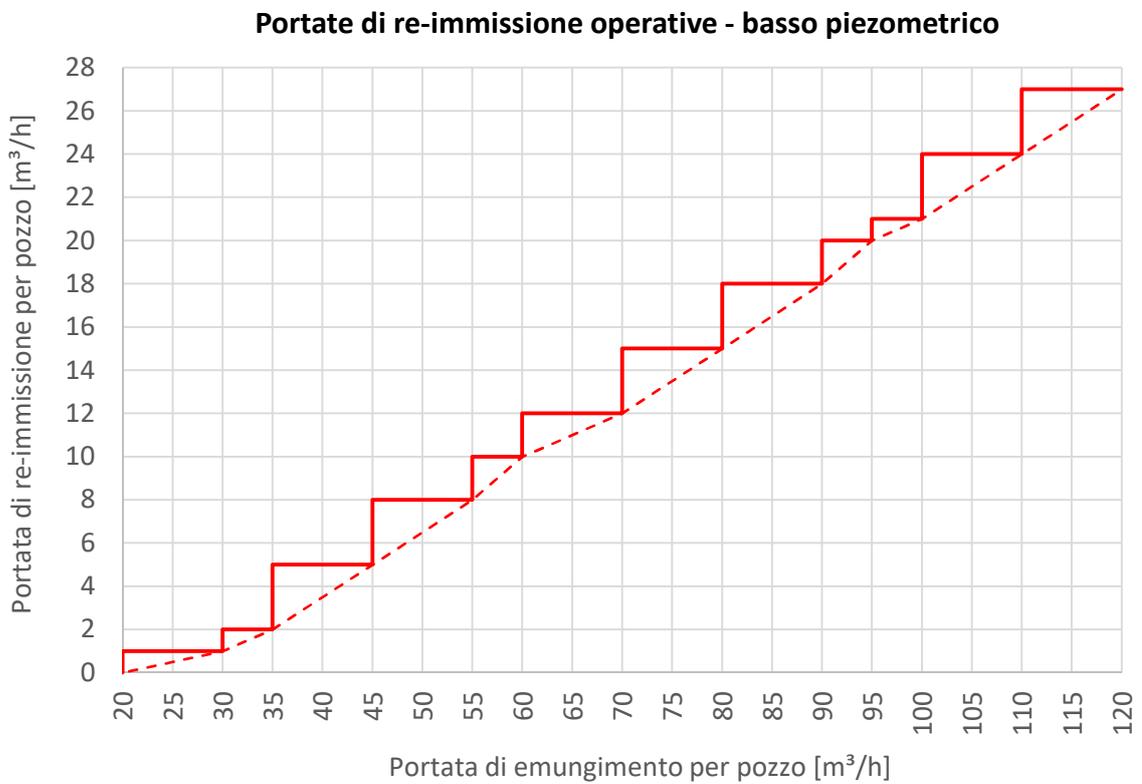


Figura 5.23 Piano operativo delle portate di re-immissione in relazione a quelle di emungimento – basso piezometrico

Portate di re-immissione in alto e in basso piezometrico

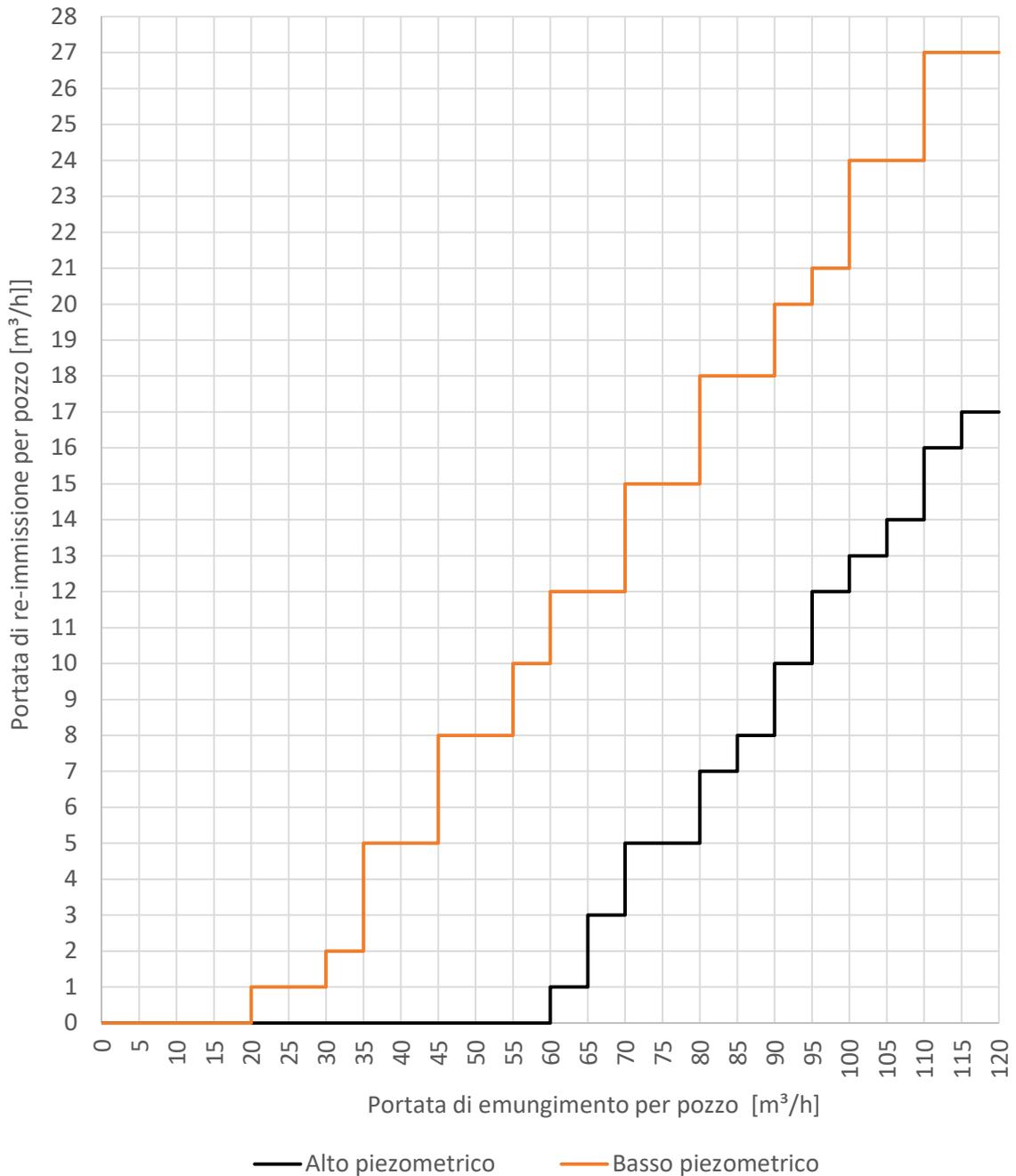


Figura 5.24 Confronto delle portate di re-immissione nelle condizioni di alto e basso piezometrico

In conclusione, quanto esposto in questo paragrafo dimostra e rende evidente l'efficacia della barriera di re-immissione. Infatti, la costruzione del sistema idraulico di barrieramento, seppur molto impegnativa sia dal punto di vista realizzativo che economico, risulta una soluzione molto valida per garantire l'attività di emungimento eliminando l'effetto indesiderato dell'avanzamento del cuneo salino.

5.4 Confronto tra le portate di progetto e simulate

Per verificare l'attendibilità dei valori delle portate di re-immissione ottenuti con le simulazioni, si è proceduto al loro confronto con i dati forniti da RAM utilizzati per il dimensionamento di dettaglio del sistema MISO. È risultato quindi utile considerare gli schemi a blocchi riportati nelle figure 2.10 e 2.11 che, con un certo grado di dettaglio, illustrano la gestione idrica dello stabilimento negli scenari di alto e basso piezometrico.

Tenendo conto delle portate emunte (sia dal sistema MIS che dai pozzi industriali), si è ricavata la portata di emungimento per ciascun pozzo che risulta pari a 78,67 m³/h e 43,30 m³/h, rispettivamente nelle condizioni di alto e basso piezometrico. Utilizzando i grafici riportati nelle Figure 5.22 e 5.23, in corrispondenza delle portate di cui sopra sono state determinate in 4,73 m³/h e 4,49 m³/h le portate di re-immissione per ciascun pozzo necessarie ad assicurare l'arretramento del fronte salino. Tali valori sono stati messi a confronto con quanto ipotizzato in fase progettuale e indicato negli schemi a blocchi con la voce "Barriera di re-immissione".

Per facilitare e rendere immediato il confronto, tutti i valori sono indicati in forma tabellare (Tabella 5.1). I valori sono stati riportati con la seconda cifra decimale per poter meglio rintracciare, sui grafici, la corrispondenza tra le portate di emungimento e quelle di re-immissione; naturalmente, trattandosi di m³/h, in fase operativa i valori vanno approssimati all'intero superiore.

Tabella 5.1 Confronto tra le portate di progetto e simulate

PORTATE DI PROGETTO			PORTATE SIMULATE		
Condizione di alto piezometrico					
Portata emunta per pozzo	[m ³ /h]	78,67	Portata emunta per pozzo	[m ³ /h]	78,67
Portata reimpressa per pozzo	[m ³ /h]	5,63	Portata reimpressa per pozzo	[m ³ /h]	4,73
Condizione di basso piezometrico					
Portata emunta per pozzo	[m ³ /h]	43,30	Portata emunta per pozzo	[m ³ /h]	43,30
Portata reimpressa per pozzo	[m ³ /h]	5,14	Portata reimpressa per pozzo	[m ³ /h]	4,49

Dalla tabella emerge una corrispondenza soddisfacente tra le portate di re-immissione ipotizzate e quelle restituite dalle simulazioni eseguite con il modello sviluppato nel lavoro di tesi. Pertanto, è confermata la validità del modello e dei parametri assunti inizialmente, sia in termini di geometria e discretizzazione che in termini di condizioni al contorno, iniziali e proprietà del terreno.

5.5 Studio del trasporto in falda

Con i risultati fino a questo punto presentati è stata dimostrata l'attendibilità del modello costruito e l'efficacia dei pozzi di re-immissione per il controllo dell'intrusione salina. Ovviamente, la gestione ottimale del sistema di pozzi non può prescindere da una modulazione adeguata delle portate di re-immissione in funzione di quelle di emungimento. Nel paragrafo 5.3 è stato individuato un piano di gestione delle portate di re-immissione tale per cui l'equilibrio acquifero – mare si mantenga in prossimità della linea di costa, evitando così il fenomeno indesiderato dell'intrusione salina.

Adesso si vuole valutare, per l'intero sistema di pozzi, l'efficacia per il controllo della qualità della falda nel sottosuolo della Raffineria. Infatti, oltre al controllo dell'avanzamento del cuneo salino, l'altro obiettivo del progetto di realizzazione dei pozzi, come spiegato in precedenza, è il monitoraggio dell'eventuale contaminazione della falda e il successivo trattamento. In sintesi, la barriera idraulica ha anche la funzione di "ricircolare" l'acqua di falda, emungendola e reimmettendola "pulita" dopo un opportuno trattamento. Nella Raffineria la costruzione dei pozzi di emungimento e di re-immissione è stata avviata proprio per ottemperare alle prescrizioni del Ministero dell'Ambiente che, per gli insediamenti industriali di questo tipo, ritiene necessario un sistema di prevenzione e controllo dell'acqua di falda. Infatti, normalmente, il flusso d'acqua proveniente da monte attraversa il sottosuolo del sito che potrebbe contenere contaminanti lisciviati dal terreno insaturo, recapitandoli direttamente a mare con conseguenze dannose per l'ambiente marino.

Per rendere evidente e comprensibile questo processo di trasporto in falda, i risultati delle simulazioni di flusso precedentemente svolte sono stati filtrati tramite l'opzione "*Fluid flow, Streamlines*", in modo da visualizzare le linee di flusso dell'acquifero in condizioni naturali, solo con attività di emungimento e con emungimento e re-immissione. In tal modo è stato possibile tracciare le traiettorie percorse dall'acqua nel sottosuolo, mentre nelle precedenti analisi idrauliche il flusso era stato rappresentato tramite le isolinee del carico idraulico, poiché si voleva studiare il fenomeno dell'avanzamento del fronte salino. Per condurre l'analisi di trasporto, il software FEFLOW prevede che vengano selezionati (in giallo) tutti i nodi della *mesh* ricadenti nella zona da cui proviene il flusso di cui si vuole studiare la traiettoria. Nel caso delle condizioni naturali sono stati evidenziati i nodi compresi nella parte a monte del modello, ottenendo le linee di flusso (linee rosse) riportate nella Figura 5.25.

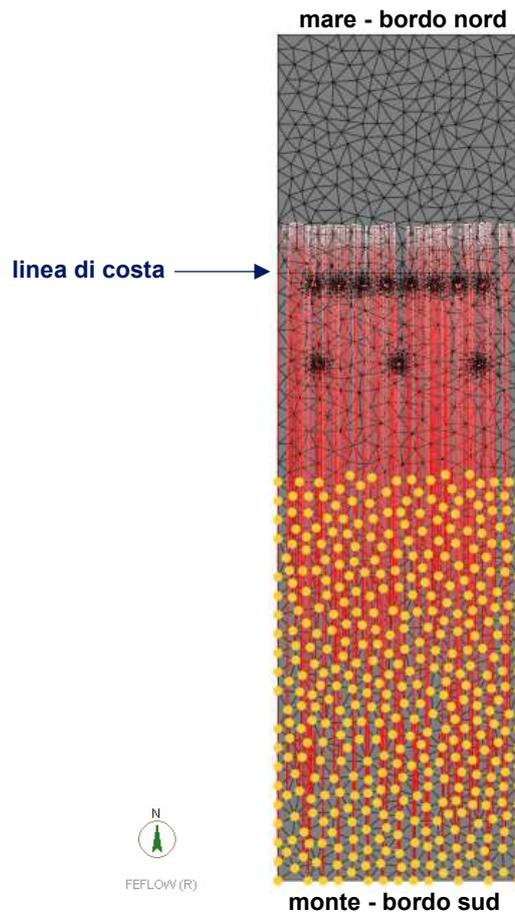


Figura 5.25 Rappresentazione delle linee di flusso (in rosso) dell'acqua dolce proveniente da monte in condizioni naturali

Tale flusso attraversa il sottosuolo, “capta” i contaminanti (se presenti) e li trasporta verso il mare diffondendoli. Per evitare ciò, come anzi detto, l’attività di emungimento dalla falda rappresenta una possibile soluzione in quanto intercetta, interrompendolo, il flusso verso il mare. Infatti, come mostrato nella Figura 5.26, le linee di flusso provenienti da monte “terminano” in corrispondenza dei pozzi di emungimento e non giungono a mare come nel caso precedente.

Per garantire il funzionamento ottimale del sistema, i pozzi di emungimento devono essere progettati in modo da determinare la formazione di una vera e propria barriera. Per tale motivo, è preferibile che essi siano costruiti lungo una linea quanto più possibile ortogonale alla direzione del flusso e con un interasse sufficientemente piccolo, al fine di intercettare una cospicua quantità d’acqua proveniente da monte e limitare il pericolo di contaminazione della falda.

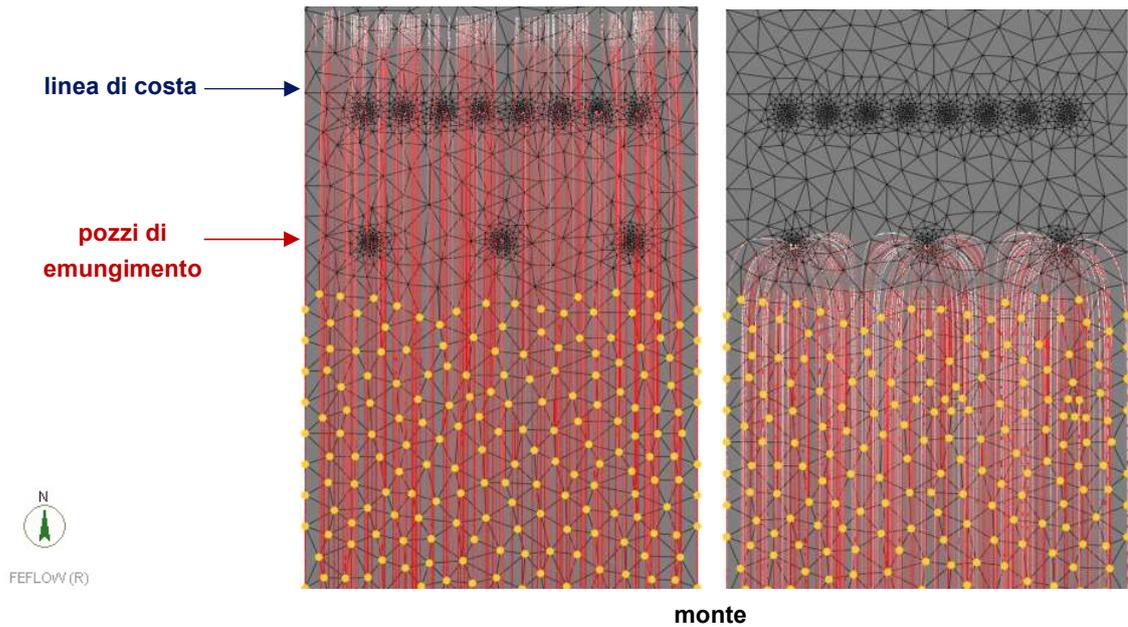


Figura 5.26 Rappresentazione delle linee di flusso (in rosso) dell'acqua dolce proveniente da monte senza emungimento (a sinistra) e con emungimento (a destra)

Tuttavia, però, come già detto, a certe portate l'emungimento genera il fenomeno dell'intrusione salina. Il cono di emungimento che si forma intorno al pozzo, infatti, oltre a captare il flusso da monte, richiama l'acqua dal mare causando l'avanzamento del cuneo salino e la presenza di cloruri nel sottosuolo del sito. Quanto detto è rappresentato nella Figura 5.27.

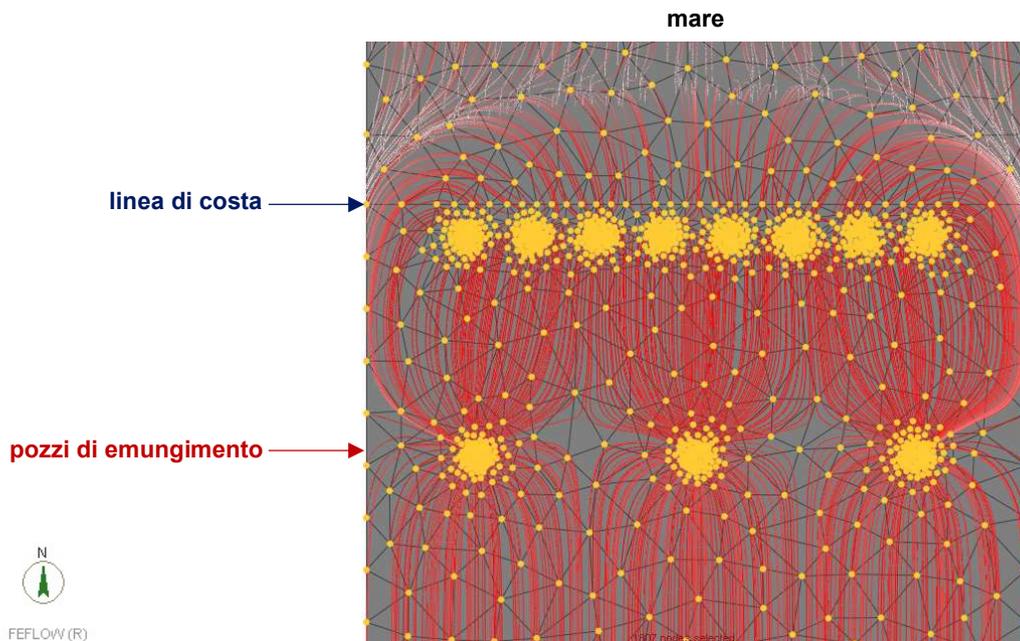


Figura 5.27 Rappresentazione delle linee di flusso (in rosso) in prossimità della linea di costa con emungimento, intrusione salina

Per eliminare l'effetto indesiderato dell'intrusione salina mantenendo quello positivo di captazione del flusso proveniente da monte, si è proceduto alla simulazione anche con la re-immissione. I pozzi di re-immissione sono alimentati da una percentuale di acqua emunta che, se necessario, prima di essere reimpressa viene opportunamente trattata dall'impianto Trattamento Acque di Falda. L'effetto della re-immissione è rappresentato nella Figura 5.28 e confrontato con la situazione precedente di solo emungimento. Gli scenari riportati mostrano come il flusso reimpresso avanzi quasi totalmente verso mare, essendo il gradiente idraulico tra i pozzi di emungimento e quelli di re-immissione prossimo allo zero.

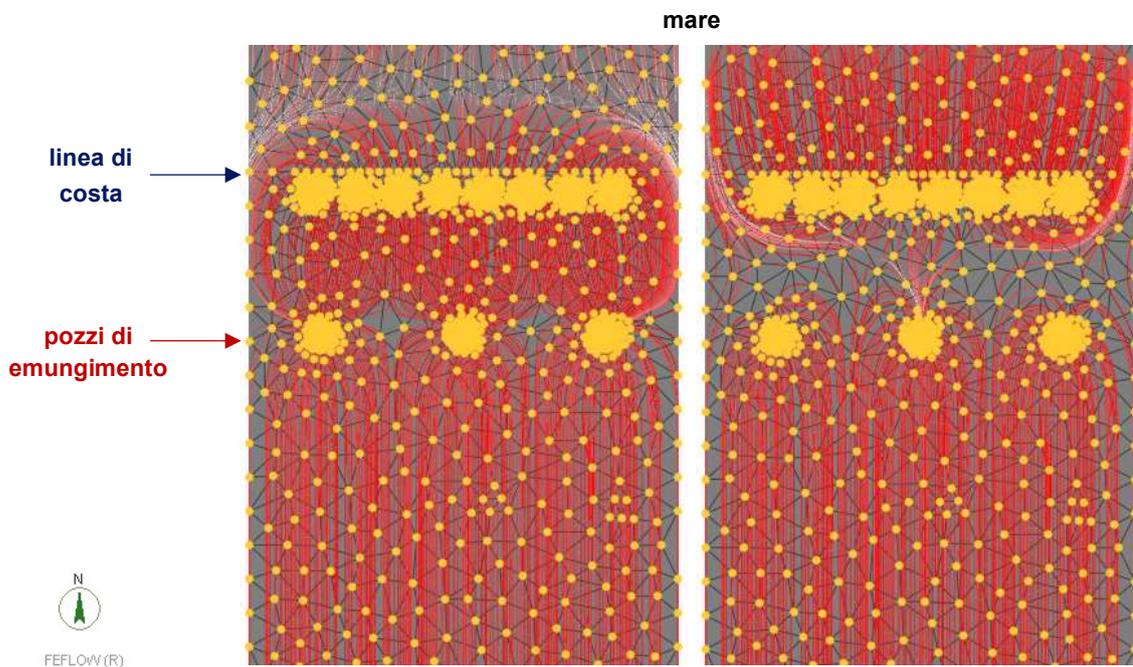


Figura 5.28 Rappresentazione delle linee di flusso (in rosso) in prossimità della linea di costa e dei pozzi, solo con emungimento (a sinistra) e con emungimento e re-immissione (a destra)

In tal modo, interrompendo il flusso da monte tramite emungimento e reimmettendo acqua monitorata, si centrano entrambi gli obiettivi di impedire l'avanzamento del cuneo salino e di garantire la qualità dell'acquifero.

5.6 Piano di monitoraggio della falda

Una volta che l'acquifero viene interessato da una significativa intrusione salina, le operazioni di "ripristino/bonifica" sono particolarmente complicate ed onerose. Per questo motivo, si tende, prevalentemente, a mettere in atto attività di prevenzione (in modo da evitare la modifica delle condizioni iniziali di equilibrio del sistema idrico) e di monitoraggio della qualità dell'acquifero. Infatti, il controllo della qualità dell'acquifero, e più propriamente della sua variazione nello spazio e nel tempo, permette di individuare, sul nascere, il processo di intrusione salina in modo da poter intervenire prontamente, ad esempio attraverso la riduzione delle portate d'acqua emunte. Nell'ottica di una gestione corretta del sistema idrico costiero, il piano di monitoraggio deve prevedere:

- La misura e il controllo del livello della falda;
- Il controllo analitico della distribuzione della concentrazione salina nell'acqua di falda.

In tal modo, incrociando le letture piezometriche con i risultati delle analisi chimiche eseguite sui campioni d'acqua prelevati, è possibile monitorare l'acquifero, controllare l'intrusione salina e garantire una gestione sostenibile del sistema idrico.

In linea generale, dal punto di vista chimico, le acque dolci differiscono da quelle salate, tra l'altro, per pH, presenza ionica e quantità di cloruri. Quest'ultima proprietà è probabilmente quella che in maniera più diretta consente di valutare l'entità del fenomeno di intrusione salina. La salinità è determinata in modo empirico partendo dal valore di conducibilità elettrica (misurata in $\mu\text{S}/\text{m}$) in quanto questa dipende dal contenuto complessivo dei sali in soluzione. Infatti tra salinità e conducibilità elettrica esiste una relazione di proporzionalità diretta. Un metodo alternativo è rappresentato dalla misurazione del contenuto di solidi totali disciolti TDS (Total Dissolved Salt), generalmente espressi in mg/l, g/l o kg/m^3 . Tramite il TDS, le acque possono essere classificate in:

- Acque dolci (TDS < 1500 mg/l);
- Acque salmastri (1500 < TDS < 5000 mg/l);
- Acque salate (TDS > 5000 mg/l).

Per definire il piano di monitoraggio occorre stabilire:

- La cadenza del prelievo dei campioni e delle letture piezometriche;
- I punti in cui prelevare i campioni ed effettuare le letture piezometriche;

- I valori soglia di accettabilità della qualità delle acque di falda.

In particolare, facendo riferimento alla porzione del sito della Raffineria modellata, le letture piezometriche e il prelievo dei campioni di acqua devono essere effettuati tra la linea di costa e i pozzi di emungimento: tale area, infatti, per portate di emungimento superiori ai valori critici individuati nel paragrafo 5.3, è quella potenzialmente interessata dall'avanzamento del cuneo salino. Per prevedere con sufficiente anticipo il rischio dell'intrusione salina e attuare interventi adeguati, è preferibile che i punti oggetto di monitoraggio siano in prossimità della costa, meglio se immediatamente a monte dei pozzi di re-immissione. Ciò permetterebbe di controllare la qualità della falda prima che il cuneo salino avanzi nell'entroterra giungendo ai pozzi di emungimento, condizione già oltre il limite di accettabilità sia dal punto di vista industriale che ambientale.

Per quanto detto, quindi, è opportuno che i punti in cui prelevare i campioni d'acqua ed effettuare le letture piezometriche ricadano oltre i pozzi di re-immissione (in modo da escludere la naturale influenza del mare) ed entro una distanza dalla linea di costa di circa 70 m. Il monitoraggio potrà essere effettuato utilizzando piezometri di controllo appositamente realizzati e allineati parallelamente alla linea di costa (compatibilmente con gli impianti esistenti), con un interesse dell'ordine di 60 m. Quanto detto è schematizzato nella Figura 5.29.

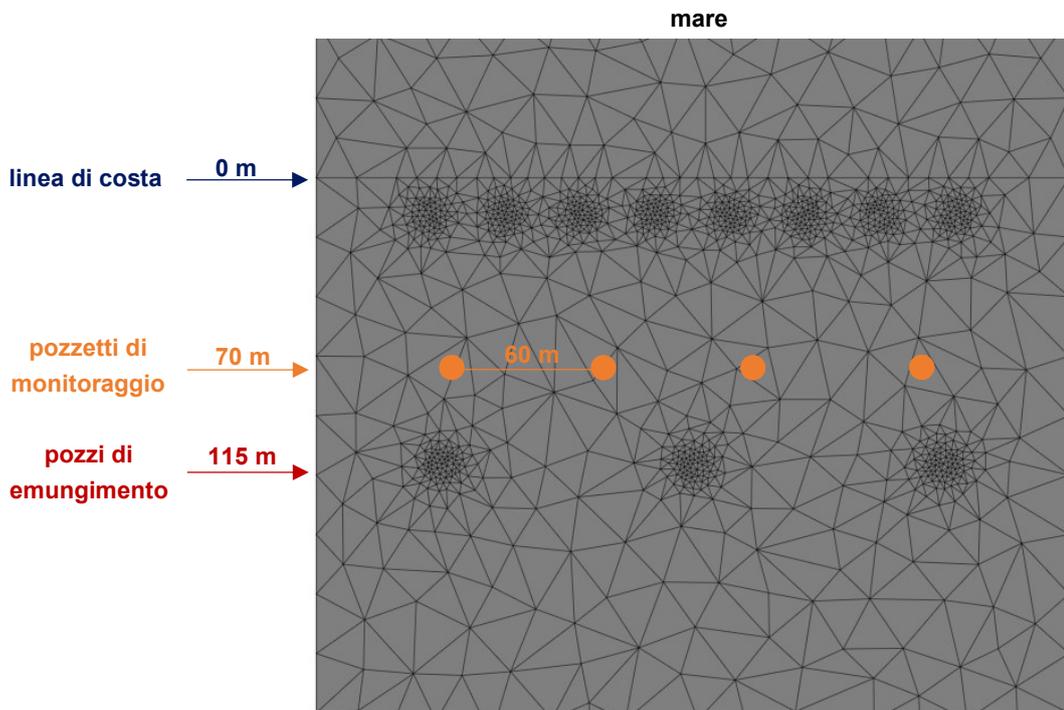


Figura 5.29 Schema dei punti di monitoraggio per la qualità delle acque sotterranee

Per la frequenza con cui effettuare il monitoraggio si è fatto riferimento ai risultati delle simulazioni di flusso svolte in precedenza, tramite i quali è stato possibile determinare la velocità di avanzamento del fronte salino nella falda, nelle condizioni di alto e basso piezometrico. Per essere certi di individuare una frequenza di campionamento conservativa per qualunque portata di emungimento, è stato rilevato l'avanzamento del fronte salino in funzione dei giorni, a seguito di una portata di emungimento pari a 120 m³/h per pozzo. Avendo considerato il fronte salino caratterizzato da una concentrazione di 3 000 mg/l, è stato costruito il grafico nella Figura 5.30, riportando in ordinata la distanza del fronte salino rispetto alla linea di costa e in ascissa il tempo necessario per percorrere tale distanza.

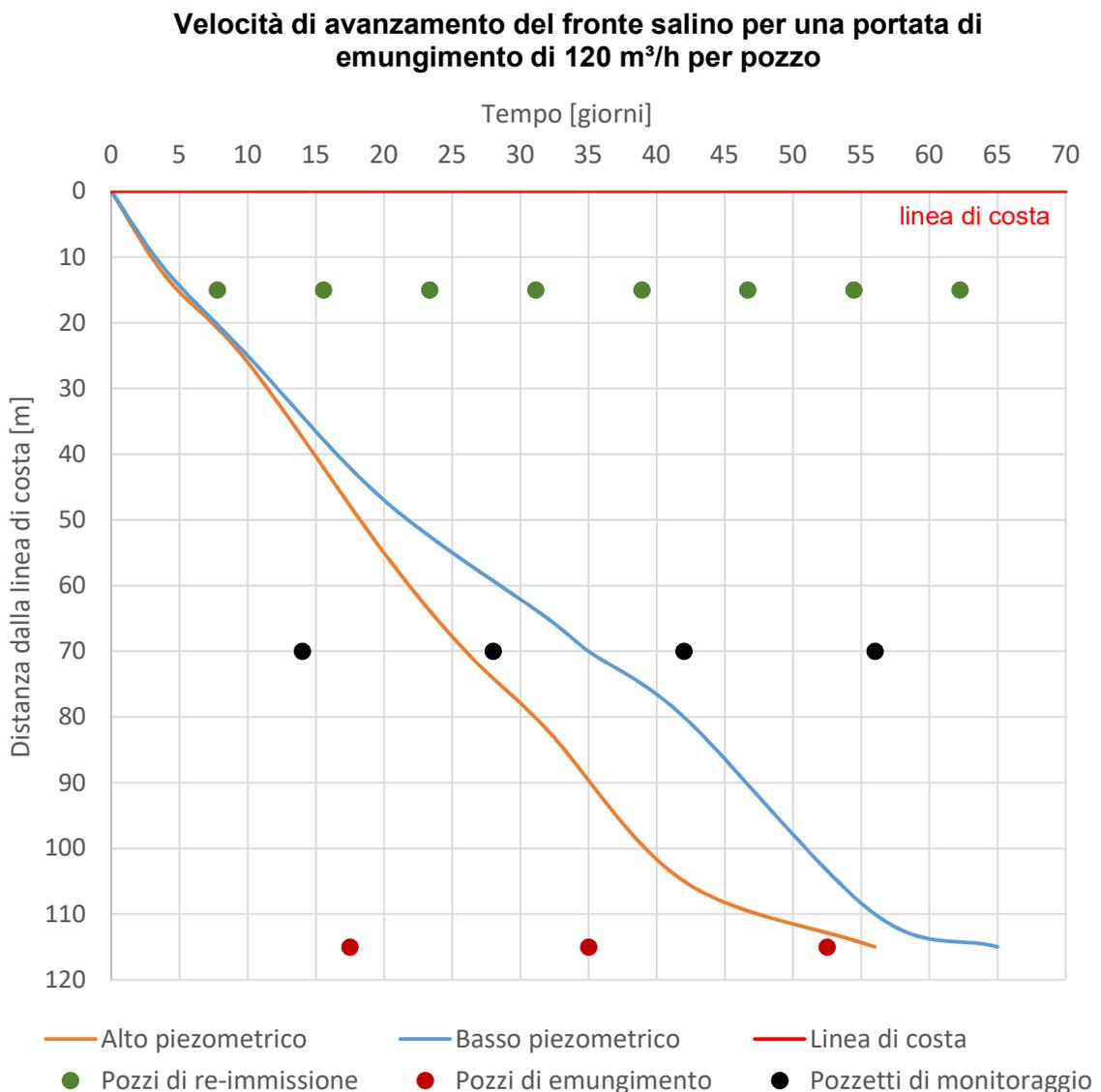


Figura 5.30 Velocità di avanzamento del fronte salino in condizioni di alto e basso piezometrico

Dalle curve riportate nella Figura 5.32 si evince che il fronte salino raggiunge i piezometri di monitoraggio (posti a 70 m dalla linea di costa) dopo 35 giorni circa in condizioni di alto piezometrico e 26 giorni circa in condizioni di basso piezometrico. Dalle stesse curve risulta anche che i pozzi di emungimento verrebbero raggiunti dopo 65 giorni circa in condizioni di alto piezometrico e 56 giorni circa in condizioni di basso piezometrico.

Da quanto rappresentato appare evidente che, per prevenire con sufficiente anticipo l'emungimento di acqua con qualità non accettabile, basterebbe monitorare la salinità della falda (mediante i piezometri allo scopo predisposti) con una frequenza massima di 26 giorni, intervallo minimo tra la condizione di alto e basso piezometrico. Tale intervallo temporale di campionamento impedisce anche che l'intrusione salina raggiunga i pozzi di emungimento nel caso in cui il controllo precedente abbia dato risultati positivi (perché, ad esempio, il fronte salino non ha ancora raggiunto i piezometri di monitoraggio). Infatti, il tempo necessario affinché il fronte salino percorra la distanza tra i piezometri di monitoraggio e i pozzi di emungimento è di 30 giorni, sia in alto che in basso piezometrico, tempo superiore alla frequenza di campionamento di 26 giorni.

La frequenza di campionamento ricavata tramite i risultati delle simulazioni del modello numerico sviluppato è in linea con quanto attualmente messo in atto presso la Raffineria di Milazzo a seguito delle prescrizioni ricevute dagli enti di controllo. Gli stessi enti hanno imposto cautelativamente frequenze di campionamento inferiori. Nella Raffineria di Milazzo, infatti, esiste un protocollo per il campionamento con cadenza quindicinale. I campioni dell'acqua di falda vengono analizzati dal laboratorio di Raffineria e ogni due mesi inviati anche ad un laboratorio certificato esterno.

Il piano di monitoraggio dell'opificio prevede inoltre, contestualmente al campionamento, letture del livello di falda in corrispondenza dei pozzi e dei piezometri presenti all'interno del sito, in modo da ricavare una legge statistica della variazione del livello dell'acquifero ed essere in grado, quindi, di gestire oggi le portate emunte e un domani anche quelle re-immesse.

Quanto detto in questo paragrafo ha l'obiettivo di evidenziare l'assoluta importanza del monitoraggio della qualità di un acquifero costiero, da cui non si può prescindere quando si vogliono gestire in modo sostenibile le risorse idriche del sottosuolo.

Sintesi

Nel Capitolo 5 sono state descritte dettagliatamente le simulazioni condotte tramite il software FEFLOW per lo studio dell'intrusione salina, per la verifica dell'efficacia della re-immissione (individuata come possibile soluzione al contenimento del fenomeno) e per il monitoraggio della qualità dell'acquifero.

Nel paragrafo 5.1 sono stati riportati i risultati delle simulazioni svolte per analizzare l'aspetto idraulico, in modo da validare il modello con la riproduzione del carico idraulico reale. La piezometria è stata ricostruita sia in alto che in basso piezometrico, al fine di valutare la correttezza delle condizioni e dei parametri inizialmente imposti che, quando necessario, sono stati modificati. Ciò per ottenere un modello in grado di riprodurre l'andamento del carico idraulico in accordo con i dati rilevati in sito tramite piezometri. Successivamente, la piezometria è stata ricostruita per diversi valori di portata di emungimento e di re-immissione per analizzare i vari scenari ipotizzati.

Dopo la validazione del modello, nel paragrafo 5.2 è stata analizzata la concentrazione in falda di cloruri a seguito del fenomeno dell'intrusione salina generato dall'attività di emungimento. In accordo con le aspettative, le simulazioni condotte in basso piezometrico hanno dimostrato che, a parità di portata emunta, la depressione della falda è più evidente rispetto alla condizione di alto piezometrico e il fronte salino avanza più profondamente e rapidamente nel sottosuolo, oltre la linea di costa. Successive simulazioni hanno permesso di verificare l'effetto della barriera di re-immissione in falda come possibile soluzione per contenere l'intrusione salina, garantendo, al contempo, l'attività di emungimento. Le elaborazioni con emungimento e re-immissione hanno dimostrato un avanzamento del cuneo salino meno consistente rispetto al caso con i soli pozzi di emungimento attivi.

Nel paragrafo 5.3 sono stati riportati i risultati ottenuti per tutti gli scenari di emungimento e re-immissione simulati, al fine di monitorare il fenomeno dell'avanzamento del cuneo salino nel tempo e in diverse condizioni, in modo da individuare un piano di esercizio delle portate di re-immissione per contrastarlo. In alto piezometrico la portata di emungimento per pozzo oltre cui si è verificata l'intrusione salina è risultata pari a 60 m³/h, in basso piezometrico a 20 m³/h. A partire da questi valori, sono stati simulati prelievi d'acqua fino a 120 m³/h per pozzo, individuando, caso per caso, le portate di re-immissione minime per generare la regressione del fronte salino.

Nel paragrafo 5.4 è stato effettuato il confronto tra le portate ricavate dal modello e quelle di progetto per lo scenario di emungimento e re-immissione schematizzate a blocchi nelle Figure 2.10 e 2.11, sia per la condizione di alto che di basso piezometrico. I risultati ottenuti sono risultati sovrapponibili, dimostrando la validità del modello e la sua attendibilità. Infatti, le portate di emungimento per pozzo utilizzate per il confronto e assunte pari a 79 m³/h (in alto piezometrico) e a 44 m³/h (in basso piezometrico) hanno restituito una portata di re-immissione prossima a 5 m³/h (portata di progetto 6 m³/h).

Nel paragrafo 5.5 è stata studiata l'efficacia della barriera idraulica di emungimento e di re-immissione per garantire il controllo della qualità della falda. Sono state condotte analisi di trasporto in falda per tracciare le linee di flusso in condizioni naturali, nello scenario di emungimento e in quello di emungimento e re-immissione contemporaneamente. I risultati ottenuti hanno dimostrato che l'attività di emungimento, intercettando il flusso proveniente da monte, evita che eventuali contaminanti presenti nel sottosuolo del sito siano recapitati a mare. Quindi la re-immissione, oltre a contrastare l'avanzamento del cuneo salino che si genera come conseguenza di tale emungimento, contribuisce al miglioramento della qualità dell'acquifero, permettendo anche di reimmettere in falda una percentuale di acqua emunta opportunamente trattata. In tal modo, la barriera idraulica si configura come un sistema di "ricircolo" e monitoraggio dell'acqua nel sito.

Nel paragrafo 5.6 è stato proposto un piano di monitoraggio delle acque di falda per controllare la distribuzione di concentrazione salina e le variazioni del livello di falda, rispettivamente tramite campionamenti e misure piezometriche. Ciò permette di individuare, sul nascere, il fenomeno dell'intrusione salina e organizzare una gestione sostenibile delle risorse idriche del sottosuolo.

6 CONCLUSIONI

Il lavoro di tesi è stato finalizzato allo studio del sistema idrico della Raffineria di Milazzo e all'analisi del fenomeno dell'intrusione salina nel sito dell'opificio, tramite l'utilizzo di un modello numerico agli elementi finiti. In particolare, è stato studiato l'avanzamento del cuneo salino in relazione all'attività di emungimento che, nel contesto industriale presentato, è effettuata per:

- Garantire l'approvvigionamento idrico dello stabilimento;
- Controllare la qualità delle acque sotterranee intercettando, con pozzi, il flusso d'acqua proveniente da monte, in modo da evitare che eventuali contaminanti presenti nel sottosuolo possano essere recapitati direttamente a mare.

Il sito della Raffineria di Milazzo risulta particolarmente sensibile al fenomeno dell'intrusione salina. L'area, infatti, sorge in prossimità della costa e, per i motivi di cui sopra, è oggetto di un'attività di emungimento dalla falda dell'ordine di circa 1 000 m³/h mediante una serie di pozzi ubicati all'interno dello stabilimento. Intorno a ciascun pozzo, si genera un cono di depressione che interessa l'acquifero e che richiama l'acqua dal mare verso l'entroterra, questo perché l'emungimento viene effettuato in prossimità della linea di costa. Ciò determina la presenza di cloruri nel sottosuolo all'interno della linea di costa con effetti dannosi sia dal punto di vista ambientale che industriale. Con riferimento a tali problematiche, il sistema idraulico del sito necessita di un'accurata analisi ingegneristica, in modo che la complessa interazione tra l'acquifero costiero e il mare possa essere indagata e una possibile soluzione rintracciata.

Detta interazione è stata studiata con il metodo agli elementi finiti che, rispetto alle trattazioni analitiche in forma chiusa, risulta più idoneo per le indagini

geotecniche che, in genere, interessano sistemi complessi agli elementi finiti e materiali di difficile caratterizzazione. L'analisi è stata svolta tramite il software FEFLOW 7.202 (DHI-WASY GmbH) con cui è stato sviluppato un modello numerico di una porzione rappresentativa del sito interessato dal fenomeno in studio.

Per determinare i dati di input utili all'ambiente di calcolo, è stata preliminarmente introdotta la caratterizzazione idrogeologica del sito. Tale caratterizzazione ha restituito un'alternanza di strati di spessore variabile di sabbia ghiaiosa e di limi con lenti d'argilla e una conducibilità idraulica dell'ordine di 10^{-4} m/s – 10^{-5} m/s (rispettivamente nel piano xy e lungo la direzione z). È stato rilevato, inoltre, un unico acquifero freatico semiconfinato da un livello d'argilla posto ad una profondità media di 30 m dal piano campagna. Gli acquiferi inferiori non sono stati considerati di interesse ai fini dell'analisi.

Le letture piezometriche hanno evidenziato variazioni dell'andamento del carico idraulico con la stagionalità dell'ordine del metro, con periodi di alto e basso piezometrico. Il periodo di basso piezometrico (novembre – marzo) è quello successivo all'estate, quando si registra la quasi totale assenza di precipitazioni; in conseguenza di ciò, la falda risente della diminuzione del flusso d'acqua in arrivo da monte che risulta invece abbondante dopo i mesi invernali, determinando, tra aprile e ottobre, un innalzamento del livello della falda (condizione di alto piezometrico).

Sulla base dei dati raccolti si è proceduto all'elaborazione del modello numerico con il software FEFLOW. Le dimensioni tridimensionali della porzione del sito modellata sono state assunte pari in pianta a 300 m per 1 065 m (rispettivamente secondo la direzione est – ovest parallela alla linea di costa e secondo la direzione nord – sud parallela al flusso d'acqua), con una profondità di 30 m rispetto al piano campagna.

In particolare, per la dimensione nord-sud è stata individuata l'estensione più ridotta possibile in modo da ottenere una geometria che garantisca "il corretto funzionamento" del modello e, al contempo, i minimi costi computazionali. Tale dimensione (1 065 m) è stata scelta dopo aver effettuato tre diverse elaborazioni numeriche, variando la distanza tra la linea di costa e il bordo sud del modello, in modo da individuare la geometria in grado di simulare correttamente l'andamento del carico idraulico rilevato in sito, sia in condizioni naturali che con emungimento (Figure 4.9 e 4.10). Il volume così ottenuto è stato discretizzato con una *mesh* di 21 *layer* (strati) spessi 1,5 m con elementi prismatici a base triangolare.

Nel modello, la geometria dell'acquifero è stata ricostruita imponendo a monte un carico idraulico di 7,65 m s.l.m. in alto piezometrico e di 4 m s.l. in basso piezometrico, valori derivati dai gradienti idraulici (1% e 0,5%) rispetto alla linea di costa desunti dalle letture piezometriche in corrispondenza dei pozzi di emungimento. Per tenere conto della densità dell'acqua salata, per i nodi ricadenti nella porzione occupata dal mare è stato utilizzato il carico d'acqua dolce equivalente, variandolo in funzione dell'altezza della colonna d'acqua salata nel nodo; inoltre, per l'acqua salata è stata imposta una concentrazione di cloruri pari a 35 000 mg/l. Infine, nel modello, sono stati inseriti i pozzi sia di emungimento che di re-immissione.

Sviluppato il modello, le simulazioni sono state elaborate secondo le fasi di seguito illustrate:

1. La piezometria del sito è stata ricostruita in condizioni naturali sia in alto che in basso piezometrico, mediante una puntuale calibrazione dei parametri imposti, in modo da ottenere la congruenza dei risultati di output con i dati rilevati in sito e, quindi, l'attendibilità del modello.
2. Dopo la fase di validazione, sono state condotte numerose simulazioni per studiare la piezometria e la distribuzione dei cloruri nella falda a seguito dell'attivazione dei pozzi di emungimento. La piezometria è stata ricostruita ipotizzando diverse portate, al fine di individuare i valori critici oltre i quali si verifica l'avanzamento del cuneo salino. In tal modo la portata critica di emungimento per pozzo è risultata pari a 60 m³/h in alto piezometrico e a 20 m³/h in basso piezometrico (Figure 5.16 e 5.17).
3. Determinate le portate critiche di emungimento oltre le quali si innesca il fenomeno indesiderato dell'intrusione salina, ed essendo possibile che queste debbano essere superate per garantire l'approvvigionamento idrico in tutte le condizioni, è stata individuata, come possibile soluzione, la realizzazione di una barriera di pozzi di re-immissione d'acqua dolce in falda in prossimità della linea di costa. La re-immissione, opportunamente modulata, ripristina il naturale equilibrio dell'interfaccia tra l'acqua dolce e quella del mare e contiene l'effetto dell'intrusione salina, garantendo comunque l'attività di emungimento. Per studiare il nuovo assetto, nel modello sono stati attivati tutti i pozzi, sia di emungimento che di re-immissione, e sono state condotte diverse simulazioni fissando per ciascuna la portata emunta e facendo variare quella di re-immissione. In tal modo, per ciascun valore di portata emunta, è stato possibile trovare il

corrispondente valore di re-immissione tale da eliminare il rischio di intrusione salina nel sito. Le simulazioni sono state effettuate per valori di portata emunta per pozzo fino a 120 m³/h.

È stata così confermata l'efficacia dell'attività di re-immissione per il contenimento dell'avanzamento del cuneo salino, sia nelle condizioni di alto che di basso piezometrico. I risultati delle simulazioni in termini di curve relative alle portate di re-immissione (Figure 5.22 e 5.23) possono essere utilizzate come piano di gestione ed esercizio del sistema di pozzi.

Per testare l'attendibilità di quanto sopra determinato, sono state messe a confronto le portate ottenute dal modello e quelle ipotizzate in fase di progetto (illustrate negli schemi a blocchi delle Figure 2.10 e 2.11). In corrispondenza delle portate di emungimento per pozzo di 79 m³/h (in alto piezometrico) e di 44 m³/h (in basso piezometrico), i grafici hanno restituito una portata di re-immissione necessaria a garantire l'arretramento del fronte salino prossima a 5 m³/h, sufficientemente in accordo con quanto ipotizzato in progetto (Tabella 5.1).

4. Infine, sono state condotte simulazioni di trasporto in falda per studiarne le linee di flusso e valutare l'efficacia dell'intero sistema di pozzi (emungimento e re-immissione) nel controllo della qualità della falda nel sottosuolo. Infatti l'attività di emungimento, intercettando il flusso d'acqua proveniente da monte, evita che questo attraversi il sottosuolo del sito giungendo direttamente a mare e recapitando eventuali contaminanti prima captati. Con le simulazioni è stato possibile ricostruire le traiettorie dei flussi, mostrando che l'attività di emungimento può, a certe portate, intercettare totalmente il flusso proveniente da monte, eliminando l'eventuale contaminazione del mare ma causando, al contempo, l'intrusione salina. Però, come è stato detto, tale fenomeno viene contrastato dalla re-immissione che, oltre ad evitare ciò, permette di "ricircolare" una percentuale d'acqua emunta dopo un opportuno trattamento, migliorando la qualità generale della falda.

In conclusione, in questo lavoro di tesi sono stati raggiunti i seguenti obiettivi:

1. *Elaborazione di un modello numerico agli elementi finiti rappresentativo dell'area oggetto di studio e del fenomeno dell'intrusione salina*

Il modello è stato sviluppato sulla base dei dati di caratterizzazione idrogeologica rilevati in sito e, successivamente, è stato calibrato e validato, in modo da ottenere risultati prossimi a quelli reali.

2. Studio del fenomeno dell'avanzamento del cuneo salino a seguito di emungimento dalla falda

L'andamento del fronte salino è stato analizzato per diversi scenari di emungimento, simulando portate via via crescenti in modo da monitorare l'evoluzione del fenomeno in relazione alla quantità d'acqua emunta.

3. Verifica dell'efficacia di una barriera di re-immissione per contrastare l'intrusione salina

Una soluzione utile a contrastare l'avanzamento del fronte salino è stata individuata nella realizzazione di una batteria di pozzi lungo la linea di costa per la re-immissione in falda di acqua dolce, in modo da ripristinare il livello dell'acquifero in prossimità della costa e ottenere l'arretramento del cuneo salino.

4. Verifica dell'efficacia dell'intera barriera idraulica (pozzi di emungimento e di re-immissione) per il controllo della qualità dell'acqua di falda

L'insieme dei pozzi di emungimento e di re-immissione è stato utilizzato per controllare la qualità dell'acqua sotterranea. I pozzi di emungimento, infatti, intercettano il flusso proveniente da monte evitando che eventuali contaminanti presenti nel sottosuolo siano recapitati direttamente a mare. L'acqua emunta e non utilizzata è reimessa in falda (dopo un eventuale trattamento), in modo da consentire, oltre all'arretramento del cuneo salino, il controllo della qualità dell'acqua del sistema idrico del sito.

Infine, è stata inoltre evidenziata l'importanza del monitoraggio della qualità di un acquifero costiero tramite campionamenti e misure piezometriche, da cui non si può assolutamente prescindere quando si vogliono gestire in maniera sostenibile le risorse idriche del sottosuolo.

BIBLIOGRAFIA

- Anderson Mary P. & Woessner William W. (1992), *“Applied Groundwater Modeling. Simulation of flow and advective transport”*;
- Bear J. (1979), *“Hydraulics of Grondwataer. McGraw-Hill, Inc., London”*;
- Barla Marco (2019-2020), Appunti e slide del corso *“Numerical methods in geotechnical engineering, 2019-2020”*;
- Barlow Paul M. (2002), *“Ground Water in Freshwater-Saltwater Environments of the Atlantic Coasts, USGS, Circular: 1262”*;
- De Wiest R.J.M. (1998), *“Ghyben-Herzberg theory. In: Encyclopedia of Hydrology and Lakes. Encyclopedia of Earth. Springer, Dordrecht”*;
- Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152;
- DHI-WASY Gmbh (2010), DHI-WASY Software FEFLOW, Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System, White Papers Vol. I;
- DHI-WASY Gmbh (2009), DHI-WASY Software FEFLOW, Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System, White Papers Vol. II;
- DHI-WASY Gmbh (2009), DHI-WASY Software FEFLOW, Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System, White Papers Vol. IV;
- FEFLOW (2019), Guida online del software FEFLOW 7.202 (DHI-WASY GmbH);
- ISPRA (2019), Archivio nazionale delle indagini del sottosuolo;
- ISPRA (2019), Carta Geologica d’Italia, Foglio 587, Milazzo;
- Raffineria di Milazzo (2019), Documentazione interna archivio Raffineria di Milazzo;
- Raffineria di Milazzo (2018), Bilancio di Sostenibilità 2018;
- Regione Siciliana, Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA);
- Weixing Guo & Christian D. Langevin (2002), *“User’s Guide to SEAWAT: A Computer Program For Simulation of Three-Dimensional Variable-Density Ground-Water Flow, U.S. Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations 6-A7”*.

SITOGRAFIA

<https://www.arpa.sicilia.it>

<https://www.camera.it>

<https://www.google.com/maps>

<http://www.isprambiente.gov.it>

<https://www.raffineriadimilazzo.it>

<https://www.wikipedia.org>

FIGURE

<i>Figura 2.1</i>	Interazione acqua dolce – acqua salata in prossimità della costa, fenomeno dell'intrusione salina.....	8
<i>Figura 2.2</i>	Zona di mescolamento dell'intrusione salina in un acquifero semiconfinato (Barlow, 2003).....	8
<i>Figura 2.3</i>	Linee equipotenziali curvilinee nella zona in prossimità della costa.....	10
<i>Figura 2.4</i>	Rete di flusso in un acquifero costiero con una zona di transizione netta.....	10
<i>Figura 2.5</i>	Schematizzazione dell'acquifero in prossimità della costa secondo le assunzioni di Dupuit.....	12
<i>Figura 2.6</i>	Intrusione salina a seguito di emungimento dalla falda con pozzi.....	13
<i>Figura 2.7</i>	Organigramma manageriale della Raffineria di Milazzo.....	16
<i>Figura 2.8</i>	Foto da Google Maps del sito della Raffineria di Milazzo (perimetro in rosso) e dell'area circostante.....	18
<i>Figura 2.9</i>	Analisi delle acque scaricate a mare (Bilancio di Sostenibilità 2018).....	21
<i>Figura 2.10</i>	Schema a blocchi del progetto di gestione idrica della RAM in alto piezometrico.....	27
<i>Figura 2.11</i>	Schema a blocchi del progetto di gestione idrica della RAM in alto piezometrico.....	28
<i>Figura 2.12</i>	Ricostruzione morfologica del piano campagna nell'area della Raffineria e nel comprensorio (Archivio RAM).....	31
<i>Figura 2.13</i>	Sequenza sedimentaria della Piana di Milazzo su cui sorge la Raffineria.....	32
<i>Figura 2.14</i>	Mappa schematica del sistema di faglie Arco Calabro-Peloritano – Tirreno Meridionale (Finetti e Del Ben, 1986).....	32
<i>Figura 2.15</i>	Stralcio della carta geologica relativo al sito della Raffineria (Archivio RAM) ..	33
<i>Figura 2.16</i>	Rappresentazione delle quote dei Bacini del Corriolo e del Mela (Archivio RAM).....	34
<i>Figura 2.17</i>	Andamento del tetto del primo livello a bassa permeabilità in corrispondenza della Raffineria e del comprensorio (Archivio RAM).....	37
<i>Figura 3.1</i>	Approssimazione della funzione $u(x,y)$ e discretizzazione con elementi di varia forma.....	43
<i>Figura 3.2</i>	Descrizione grafica dell'opzione "Free" per la simulazione della superficie freatica (Guida online FEFLOW).....	48
<i>Figura 3.3</i>	Rappresentazione del concetto di "Carico d'acqua dolce equivalente".....	51
<i>Figura 4.1</i>	Vista in pianta e sezione trasversale del modello con la disposizione dei pozzi, la linea di costa (linea nera tratteggiata) e il livello del mare assunto come quota di riferimento (linea azzurra tratteggiata).....	58
<i>Figura 4.2</i>	Dominio di calcolo, costruzione della supermesh.....	61
<i>Figura 4.3</i>	Costruzione della mesh con elementi finiti triangolari infittiti in prossimità dei pozzi.....	62
<i>Figura 4.4</i>	Vista 3D del modello estruso verticalmente con indicazioni sui pozzi e la linea di costa (fattore di scala verticale pari a 5 volte quello orizzontale).....	63
<i>Figura 4.5</i>	Condizione al contorno idraulica "Multilayer Well" in corrispondenza dei pozzi, vista 3D (fattore di scala verticale pari a 5 volte quello orizzontale).....	64
<i>Figura 4.6</i>	Impostazione delle condizioni al contorno idrauliche, vista in pianta del	

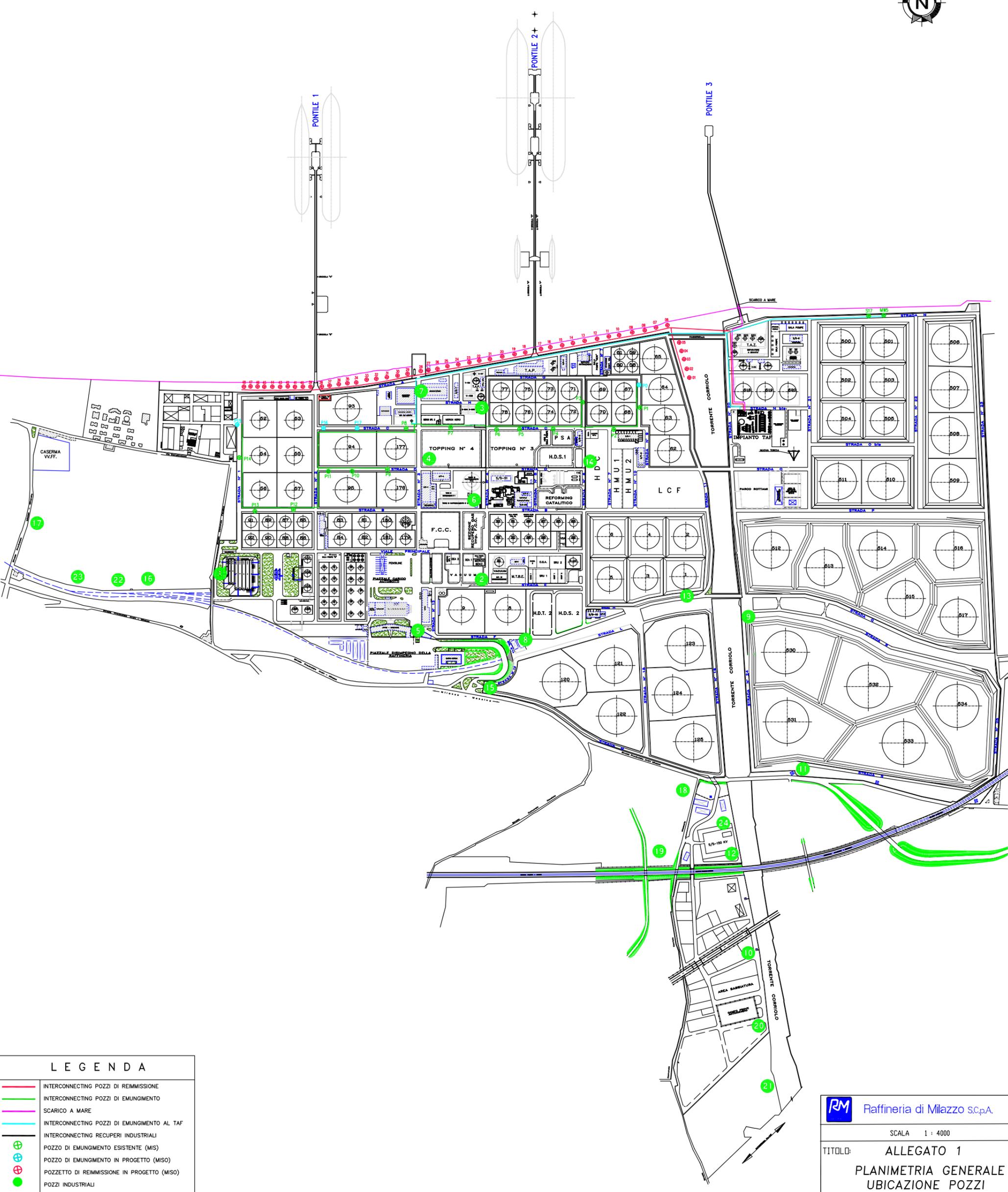
	modello.....	65
<i>Figura 4.7</i>	Impostazione delle condizioni al contorno idrauliche, vista 3D (fattore di scala verticale pari a 5 volte quello orizzontale).....	65
<i>Figura 4.8</i>	Assegnazione delle condizioni iniziali di salinità, vista planimetrica del modello	67
<i>Figura 4.9</i>	Schematizzazione delle tre geometrie utilizzate per la determinazione dell'estensione del modello secondo l'asse nord-sud.....	70
<i>Figura 4.10</i>	Andamento del carico idraulico alla profondità di 30 m da p.c. per la scelta dell'estensione del modello secondo l'asse nord-sud.....	72
<i>Figura 5.1</i>	Passo temporale delle iterazioni con cui viene raggiunta la condizione di equilibrio per la riproduzione del carico piezometrico senza emungimento	75
<i>Figura 5.2</i>	Ricostruzione dell'andamento del carico idraulico in alto piezometrico in condizioni naturali, in superficie (a sinistra) e alla profondità di 30 m (a destra)	76
<i>Figura 5.3</i>	Andamento del carico idraulico in alto piezometrico con emungimento pari a 60 m ³ /h per ciascun pozzo, in superficie (a sinistra) e alla profondità di 30 m (a destra).....	77
<i>Figura 5.4</i>	Confronto del carico idraulico in alto piezometrico in prossimità dei pozzi di emungimento in condizioni naturali (in alto) e con captazione di acqua per 60 m ³ /h per pozzo (in basso) – Sezione del modello alla profondità di 30 m	78
<i>Figura 5.5</i>	Confronto del carico idraulico in basso piezometrico in prossimità dei pozzi di emungimento in condizioni naturali (in alto) e con captazione di acqua per 60 m ³ /h per pozzo (in basso) – Sezione del modello alla profondità di 30 m	79
<i>Figura 5.6</i>	Andamento del carico idraulico in alto piezometrico con portate di emungimento e di re-immissione pari a 60 m ³ /h e a 15 m ³ /h per ciascun pozzo, in superficie (a sinistra) e alla profondità di 30 m (a destra).....	81
<i>Figura 5.7</i>	Andamento delle isolinee rispetto alla linea di costa verso monte in condizioni naturali, con solo emungimento e con emungimento e re-immissione, per visualizzare l'effetto del prelievo d'acqua e della successiva re-immissione....	82
<i>Figura 5.8</i>	Confronto del carico idraulico in alto piezometrico in condizioni naturali (in alto), con emungimento per pozzo di 60 m ³ /h (in centro), con emungimento e re-immissione per pozzo di 60 m ³ /h e di 15 m ³ /h (in basso) – Sezione del modello alla profondità di 30 m	83
<i>Figura 5.9</i>	Distribuzione della concentrazione salina in alto piezometrico in condizioni naturali, in superficie (a sinistra) e alla profondità di 30 m (a destra)	84
<i>Figura 5.10</i>	Particolare tridimensionale del cuneo salino in condizioni naturali senza emungimento in alto piezometrico	85
<i>Figura 5.11</i>	Distribuzione della concentrazione salina in alto piezometrico con emungimento pari a 40 m ³ /h per ciascun pozzo, in superficie (a sinistra) e alla profondità di 30 m (a destra).....	86
<i>Figura 5.12</i>	Distribuzione della concentrazione salina in alto piezometrico con emungimento pari a 70 m ³ /h per ciascun pozzo, in superficie (a sinistra) e alla profondità di 30 m (a destra).....	86
<i>Figura 5.13</i>	Distribuzione della concentrazione salina in alto piezometrico con emungimento e re-immissione pari rispettivamente a 70 m ³ /h e 1 m ³ /h per ciascun pozzo, in superficie (a sinistra) e alla profondità di 30 m (a destra)....	87
<i>Figura 5.14</i>	Distribuzione della concentrazione salina in alto piezometrico con emungimento e re-immissione pari rispettivamente a 70 m ³ /h e 5 m ³ /h per ciascun pozzo, in superficie (a sinistra) e alla profondità di 30 m (a destra)....	88

<i>Figura 5.15</i>	Avanzamento del cuneo salino rispetto alla linea di costa in differenti scenari (linea tratteggiata), rappresentazione della fascia di mescolamento acqua dolce-acqua salata.....	89
<i>Figura 5.16</i>	Avanzamento del cuneo salino con attività di emungimento in alto piezometrico.....	91
<i>Figura 5.17</i>	Avanzamento del cuneo salino con attività di emungimento in basso piezometrico.....	91
<i>Figura 5.18</i>	Portate di re-immissione per contrastare l'intrusione salina in funzione dell'emungimento, distanza del fronte salino dalla linea di costa solo con emungimento e con emungimento e re-immissione – Piano campagna, alto piezometrico.....	93
<i>Figura 5.19</i>	Portate di re-immissione per contrastare l'intrusione salina in funzione dell'emungimento, distanza del fronte salino dalla linea di costa solo con emungimento e con emungimento e re-immissione – Quota -30 m da piano campagna, alto piezometrico.....	94
<i>Figura 5.20</i>	Portate di re-immissione per contrastare l'intrusione salina in funzione dell'emungimento, distanza del fronte salino dalla linea di costa solo con emungimento e con emungimento e re-immissione – Piano campagna, basso piezometrico.....	95
<i>Figura 5.21</i>	Portate di re-immissione per contrastare l'intrusione salina relative alle portate di emungimento, distanza del fronte salino dalla linea di costa solo con emungimento e con emungimento e re-immissione – Quota -30 m da piano campagna, basso piezometrico.....	96
<i>Figura 5.22</i>	Piano operativo delle portate di re-immissione in relazione a quelle di emungimento – alto piezometrico.....	98
<i>Figura 5.23</i>	Piano operativo delle portate di re-immissione in relazione a quelle di emungimento – basso piezometrico.....	98
<i>Figura 5.24</i>	Confronto delle portate di re-immissione nelle condizioni di alto e basso piezometrico.....	99
<i>Figura 5.25</i>	Rappresentazione delle linee di flusso (in rosso) dell'acqua dolce proveniente da monte in condizioni naturali.....	102
<i>Figura 5.26</i>	Rappresentazione delle linee di flusso (in rosso) dell'acqua dolce proveniente da monte senza emungimento (a sinistra) e con emungimento (a destra).....	103
<i>Figura 5.27</i>	Rappresentazione delle linee di flusso (in rosso) in prossimità della linea di costa con emungimento, intrusione salina.....	103
<i>Figura 5.28</i>	Rappresentazione delle linee di flusso (in rosso) in prossimità della linea di costa e dei pozzi solo con emungimento (a sinistra) e con emungimento e re-immissione (a destra).....	104
<i>Figura 5.29</i>	Schema dei punti di monitoraggio per la qualità delle acque sotterranee.....	106
<i>Figura 5.30</i>	Velocità di avanzamento del fronte salino in condizioni di alto e basso piezometrico.....	107

TABELLE

<i>Tabella 2.1</i>	Prodotti finiti del ciclo di raffinazione e relativi utilizzi	17
<i>Tabella 2.2</i>	Approvvigionamento idrico RAM (Bilancio di Sostenibilità 2018)	20
<i>Tabella 5.1</i>	Confronto tra le portate di progetto e simulate.....	100

ALLEGATI



LEGENDA

- INTERCONNECTING POZZI DI REIMMISSIONE
- INTERCONNECTING POZZI DI EMUNGIMENTO
- SCARICO A MARE
- INTERCONNECTING POZZI DI EMUNGIMENTO AL TAF
- INTERCONNECTING RECUPERI INDUSTRIALI
- ⊕ POZZO DI EMUNGIMENTO ESISTENTE (MIS)
- ⊕ POZZO DI EMUNGIMENTO IN PROGETTO (MISO)
- ⊕ POZZETTO DI REIMMISSIONE IN PROGETTO (MISO)
- POZZI INDUSTRIALI

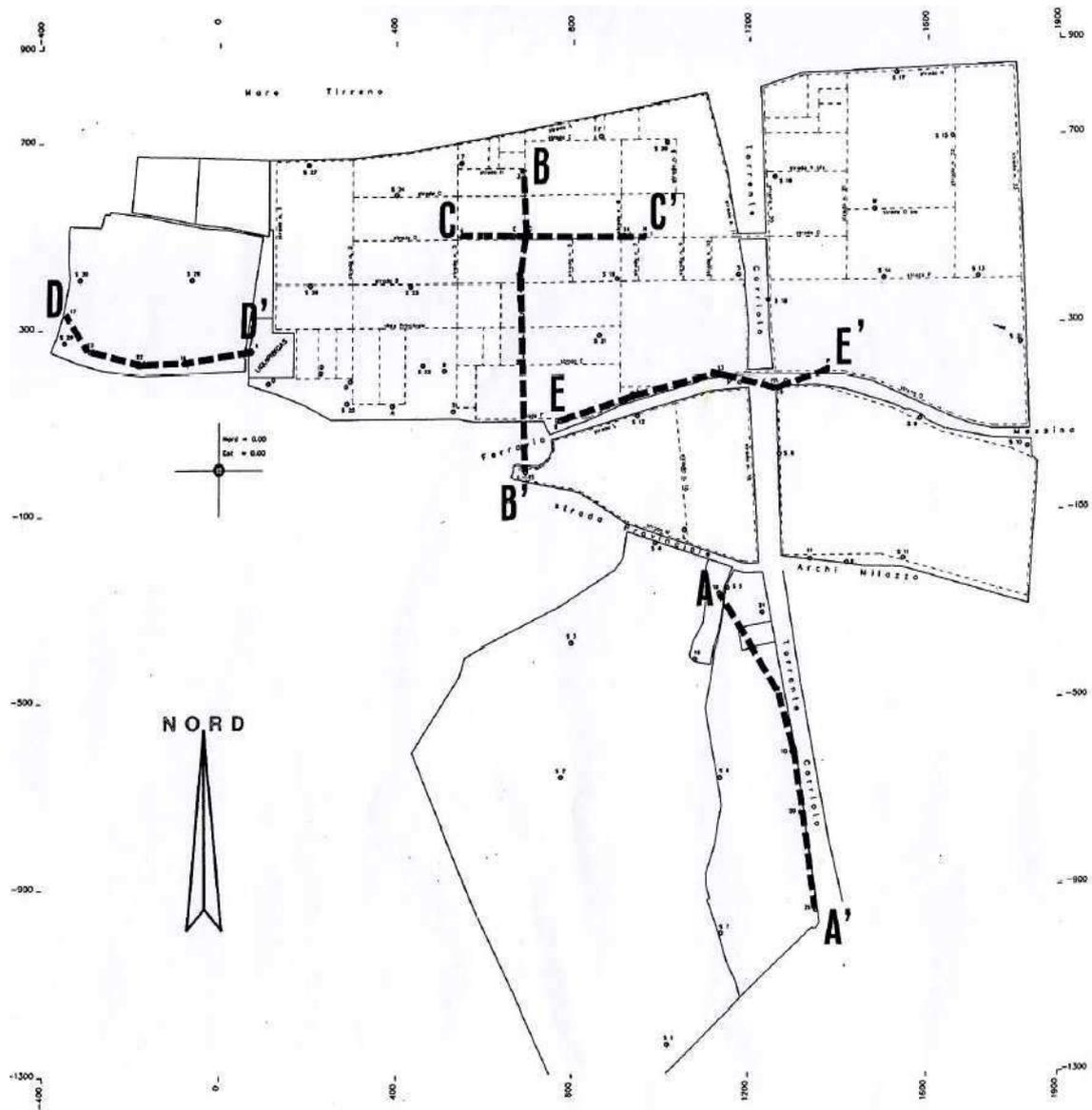
RM Raffineria di Milazzo S.p.A.

SCALA 1 : 4000

TITOLO: ALLEGATO 1
PLANIMETRIA GENERALE
UBICAZIONE POZZI

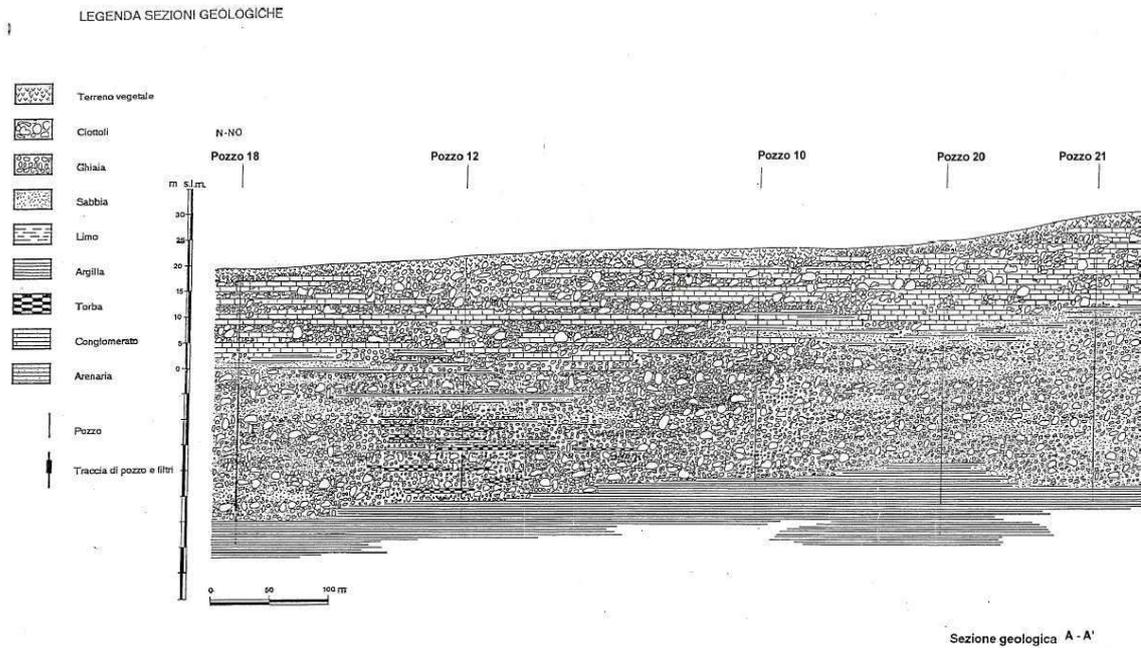
La raffineria di Milazzo S.p.A. è un'azienda leader di qualità certificata e di gestione responsabile e si impegna a fare sempre più verde il proprio territorio.

**ALLEGATO 2 – TRACCE E SEZIONI IDROGEOLOGICHE ECOTHERM
S.P.A. (1992)**



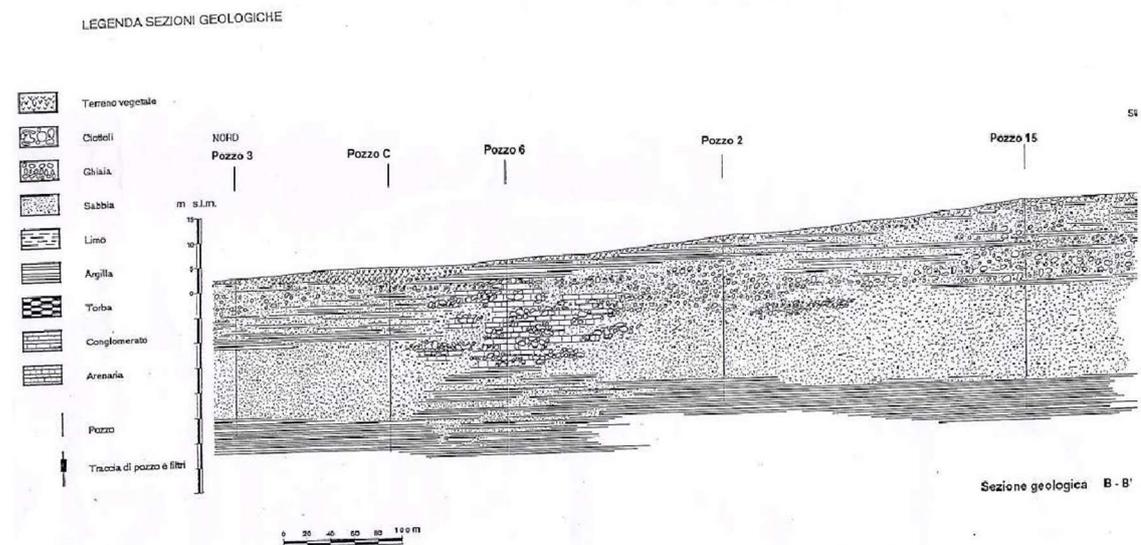
ALLEGATO 2 – Sezione idrogeologica A-A' (Ecotherm S.p.a. 1992)

Sezione A-A'



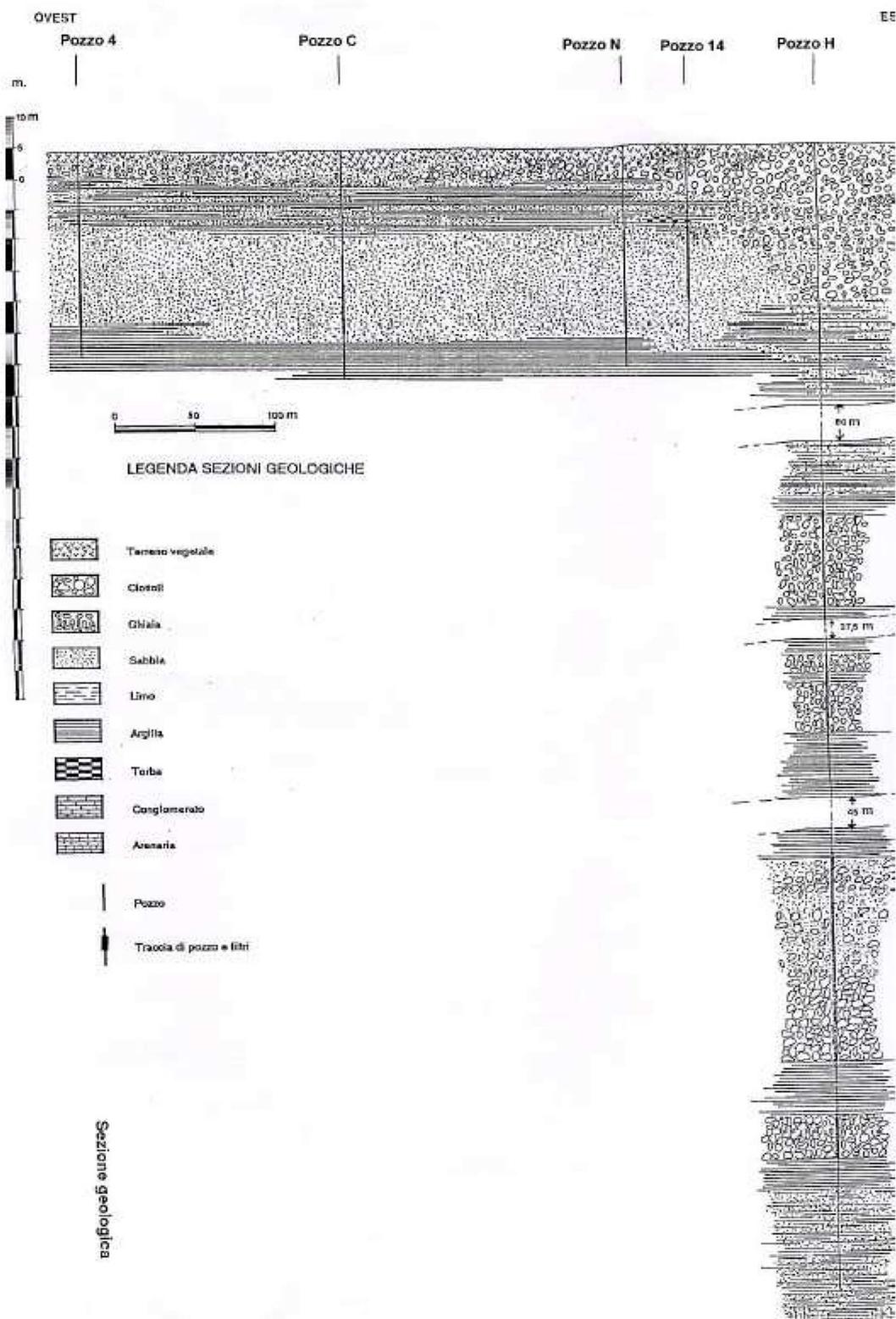
ALLEGATO 2 – Sezione idrogeologica B-B' (Ecotherm S.p.a. 1992)

Sezione B-B'



ALLEGATO 2 – Sezione idrogeologica C-C' (Ecotherm S.p.a. 1992)

Sezione C-C'

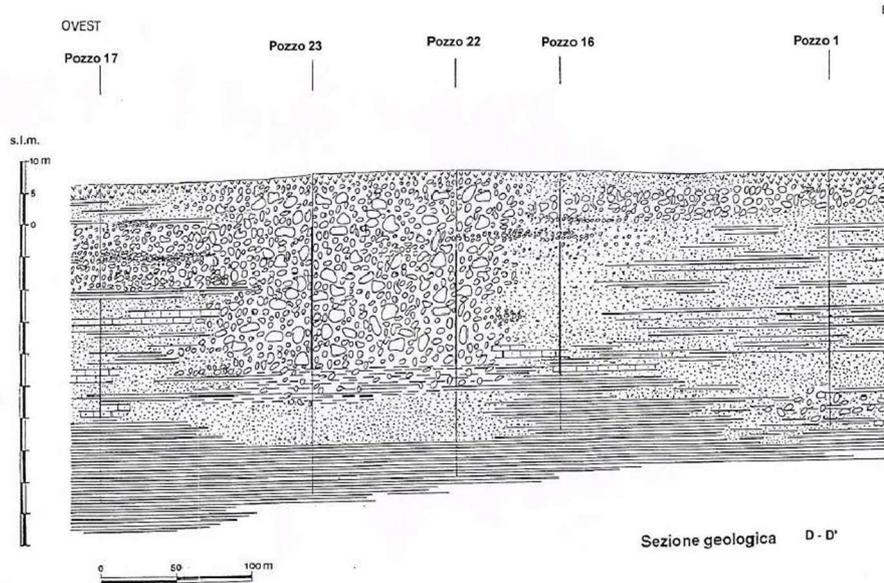


ALLEGATO 2 – Sezione idrogeologica D-D' (Ecotherm S.p.a. 1992)

Sezione D-D'

LEGENDA SEZIONI GEOLOGICHE

-  Terreno vegetale
-  Ciottoli
-  Ghiaia
-  Sabbia
-  Limo
-  Argilla
-  Torba
-  Conglomerato
-  Arenaria
-  Pozzo
-  Traccia di pozzo e filtri

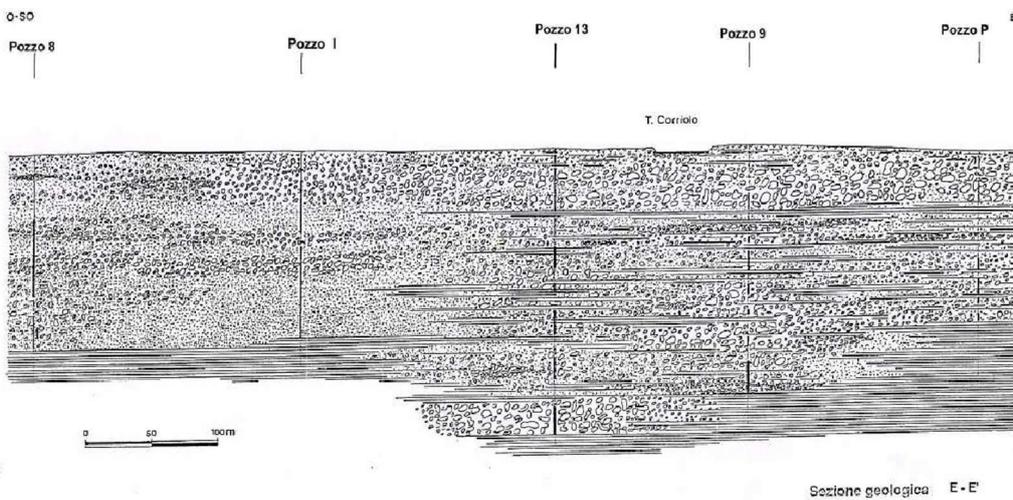


ALLEGATO 2 – Sezione idrogeologica E-E' (Ecotherm S.p.a. 1992)

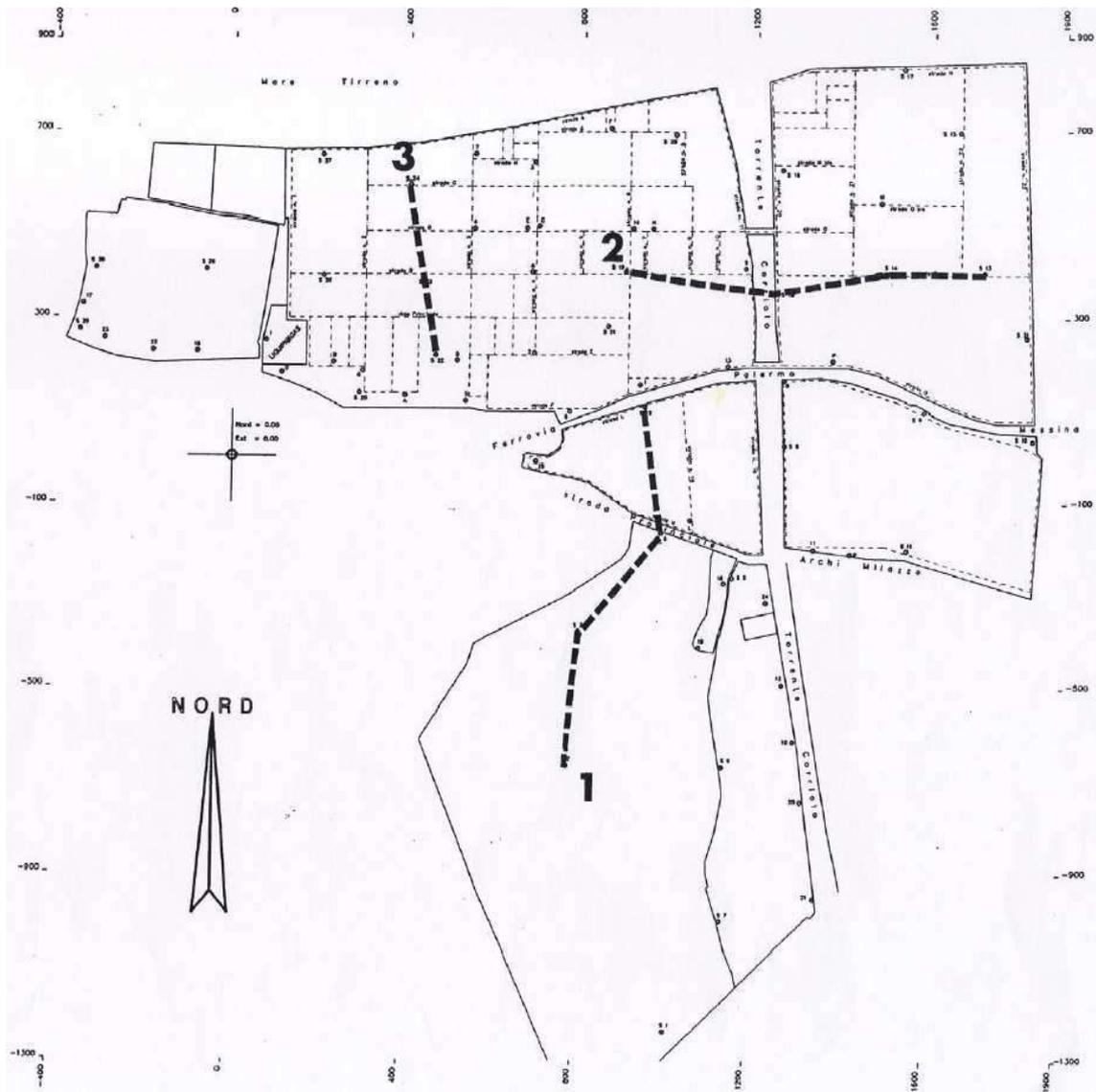
Sezione E-E'

LEGENDA SEZIONI GEOLOGICHE

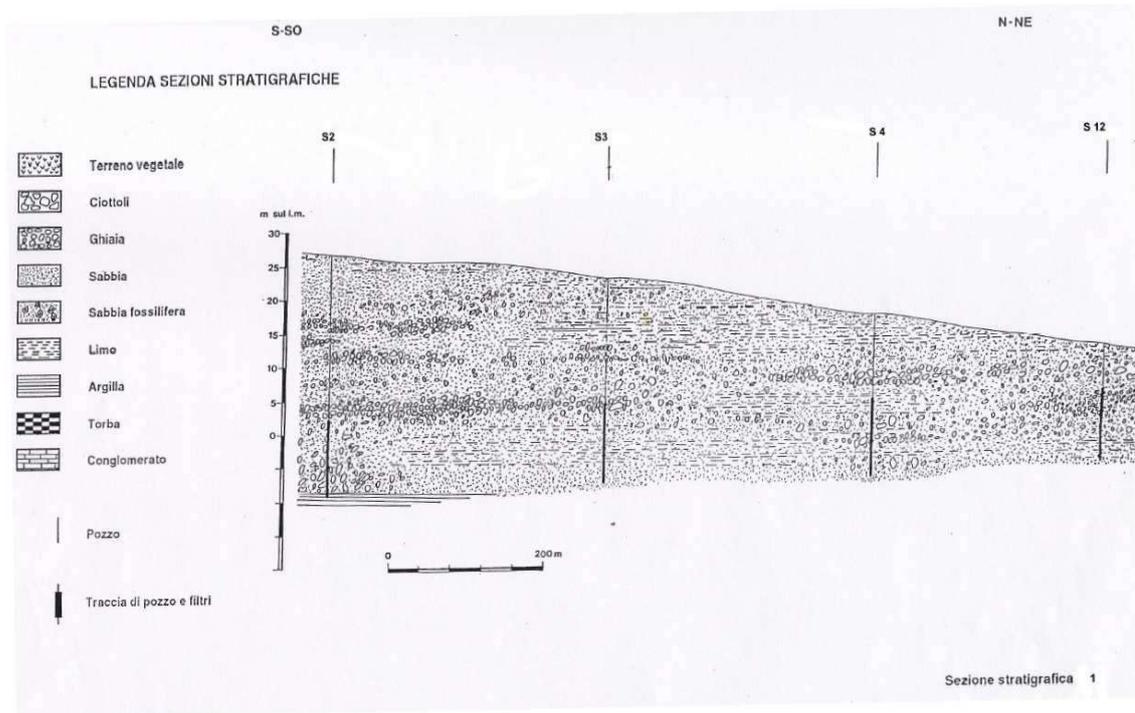
-  Terreno vegetale
-  Ciottoli
-  Ghiaia
-  Sabbia
-  Limo
-  Argilla
-  Torba
-  Conglomerato
-  Arenaria
-  Pozzo
-  Traccia di pozzo e filtri



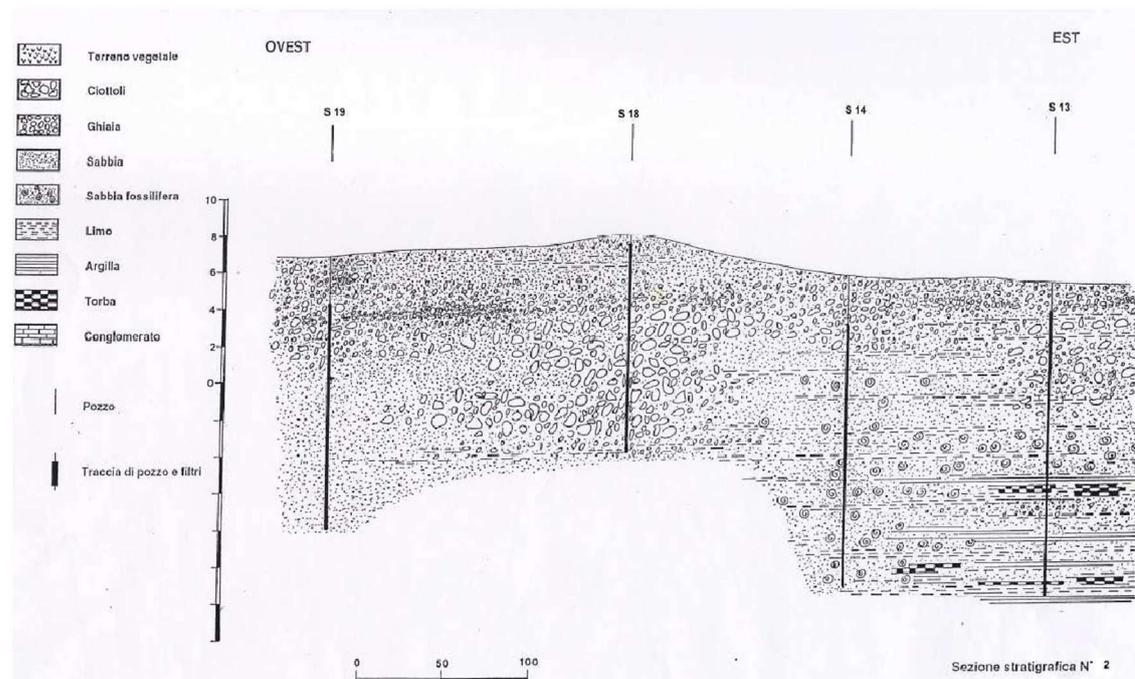
**ALLEGATO 2 – TRACCE E SEZIONI IDROGEOLOGICHE ECOTHERM
S.P.A. (1992)**



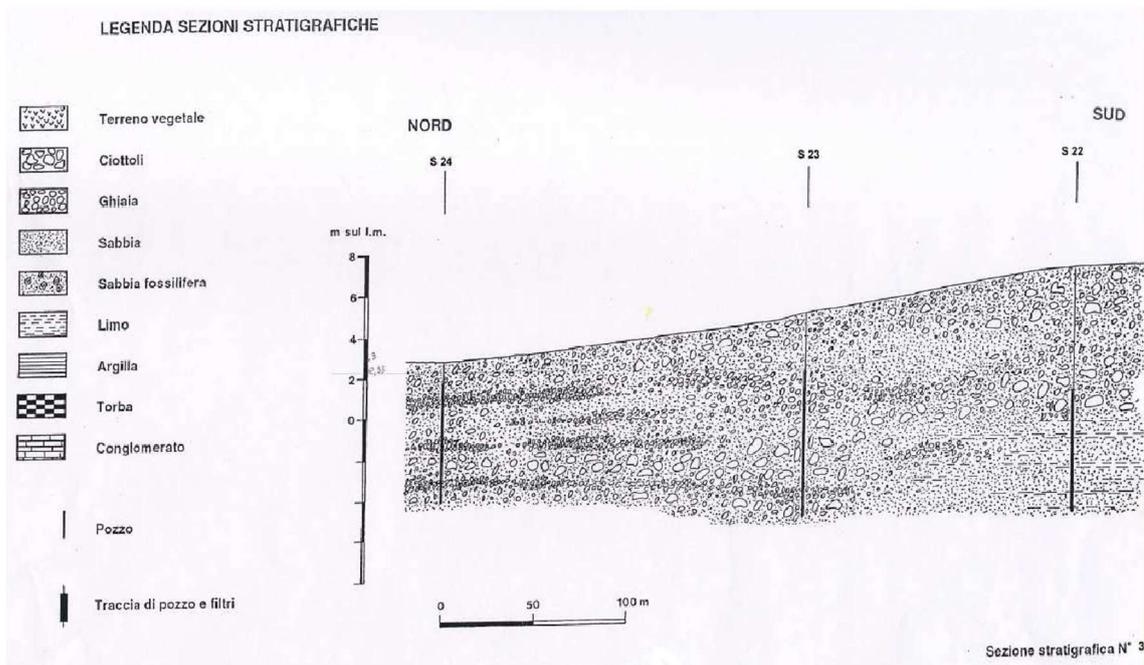
ALLEGATO 2 – Sezione idrogeologica n°1 (Ecotherm S.p.a. 1992)



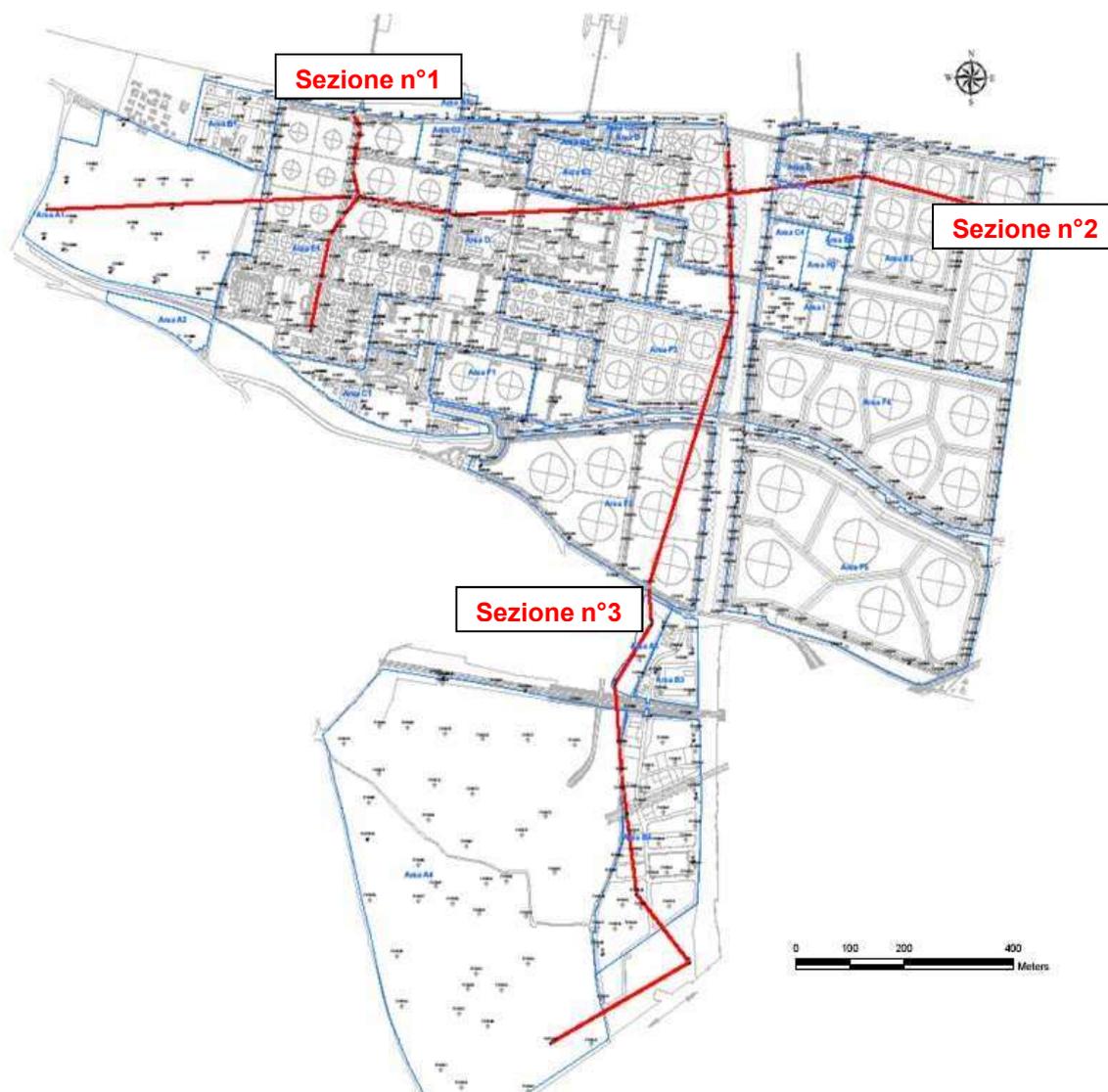
ALLEGATO 2 – Sezione idrogeologica n°2 (Ecotherm S.p.a. 1992)



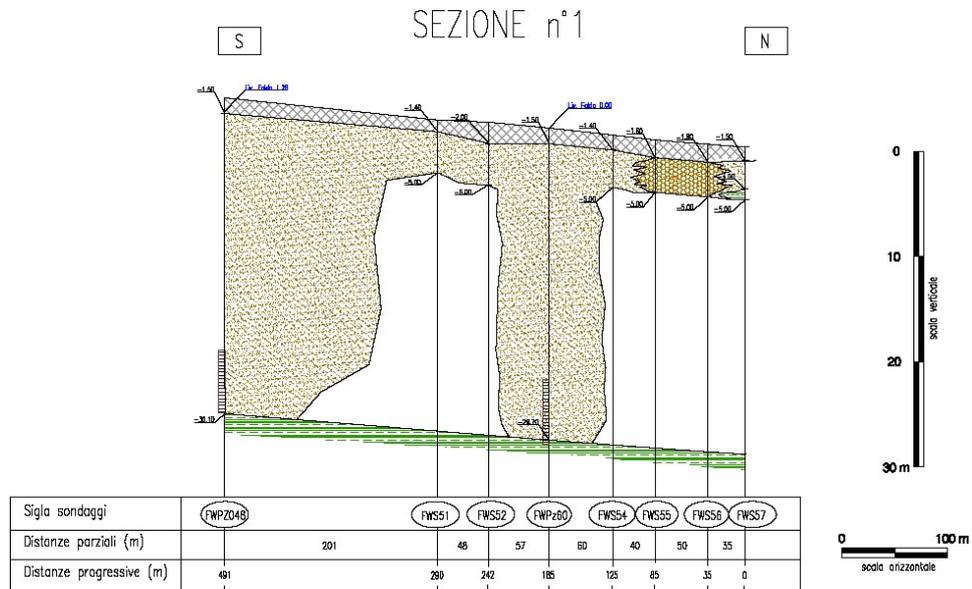
ALLEGATO 2 – Sezione idrogeologica n°3 (Ecotherm S.p.a. 1992)



ALLEGATO 3 – TRACCE E SEZIONI IDROGEOLOGICHE DEL SITO (2010)



ALLEGATO 3 – Sezione idrogeologica del sito n°1 (2010)

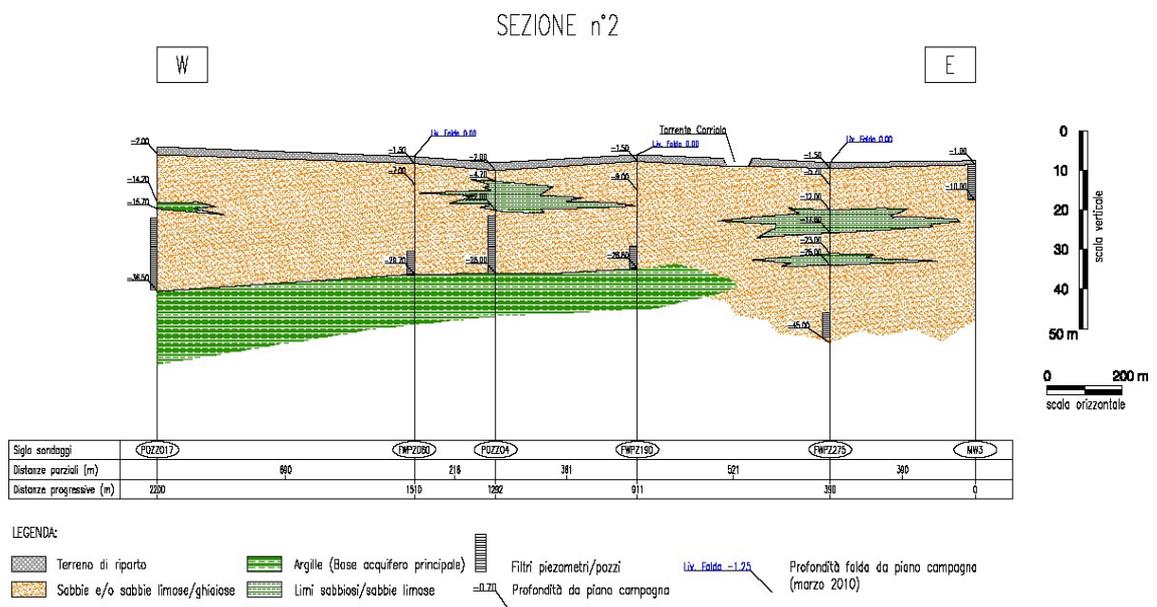


LEGENDA:

- Terreno di riporto
- Sabbie e/o sabbie limose/ghiaiose
- Argille (Base acquifero principale)
- Limi sabbiosi/sabbie limose
- Filtri piezometri/pozzi
- Profondità da piano campagna
- Ghiaia limoso sabbiosa con ciottoli

Liv. Falda -1.25 Profondità falda da piano campagna (marzo 2010)

ALLEGATO 3 – Sezione idrogeologica del sito n°2 (2010)

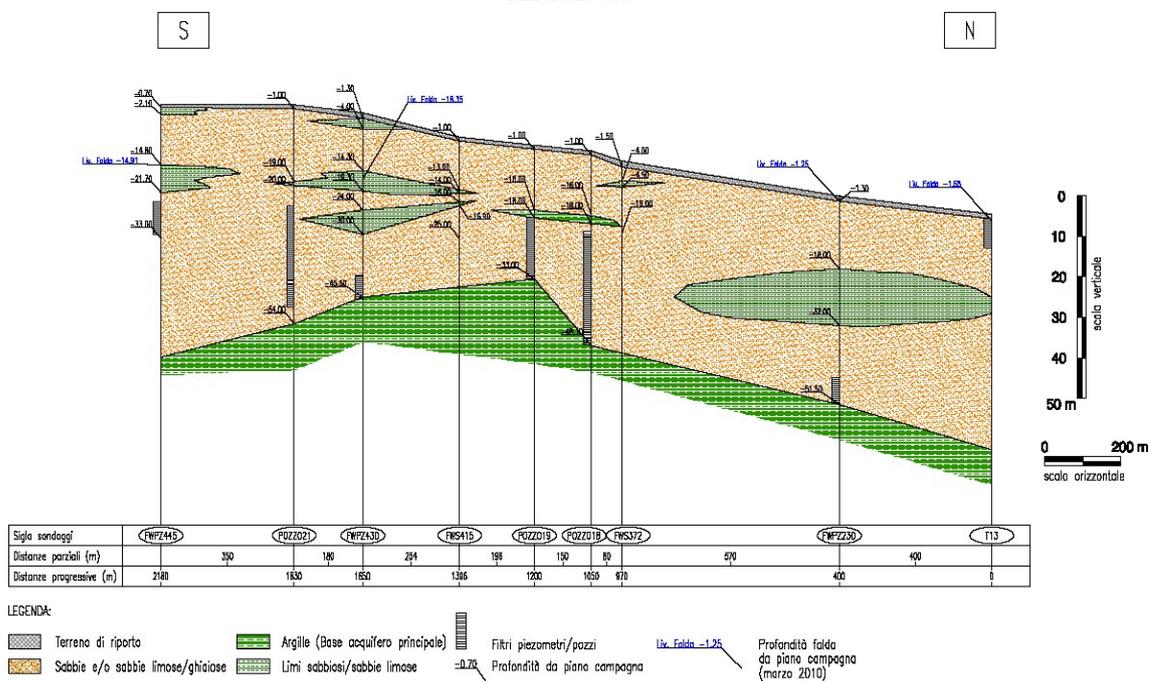


LEGENDA:

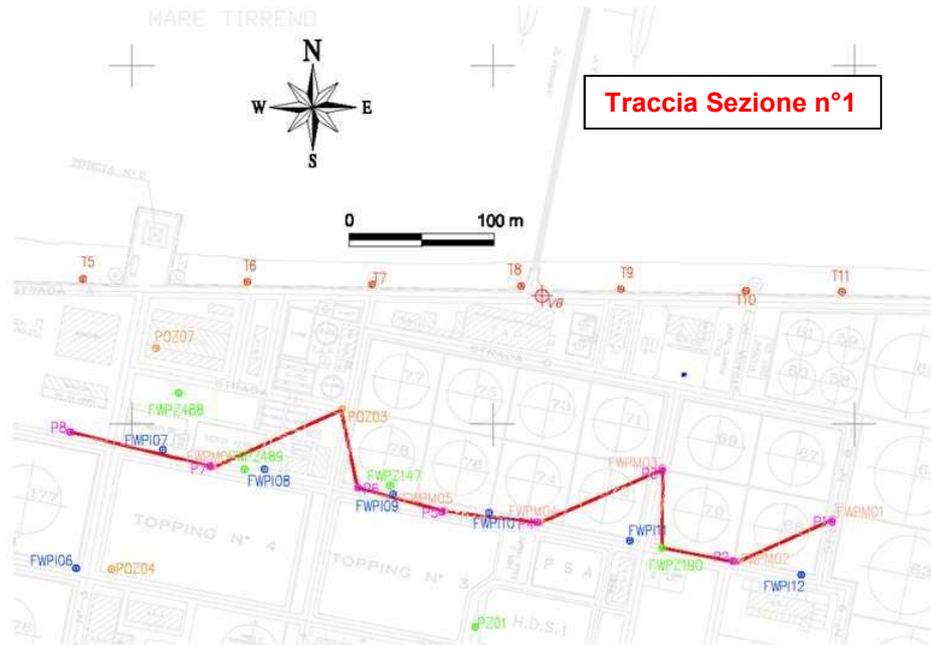
- Terreno di riporto
- Sabbie e/o sabbie limose/ghiaiose
- Argille (Base acquifero principale)
- Limi sabbiosi/sabbie limose
- Filtri piezometri/pozzi
- Profondità falda da piano campagna (marzo 2010)
- Profondità da piano campagna

ALLEGATO 3 – Sezione idrogeologica del sito n°3 (2010)

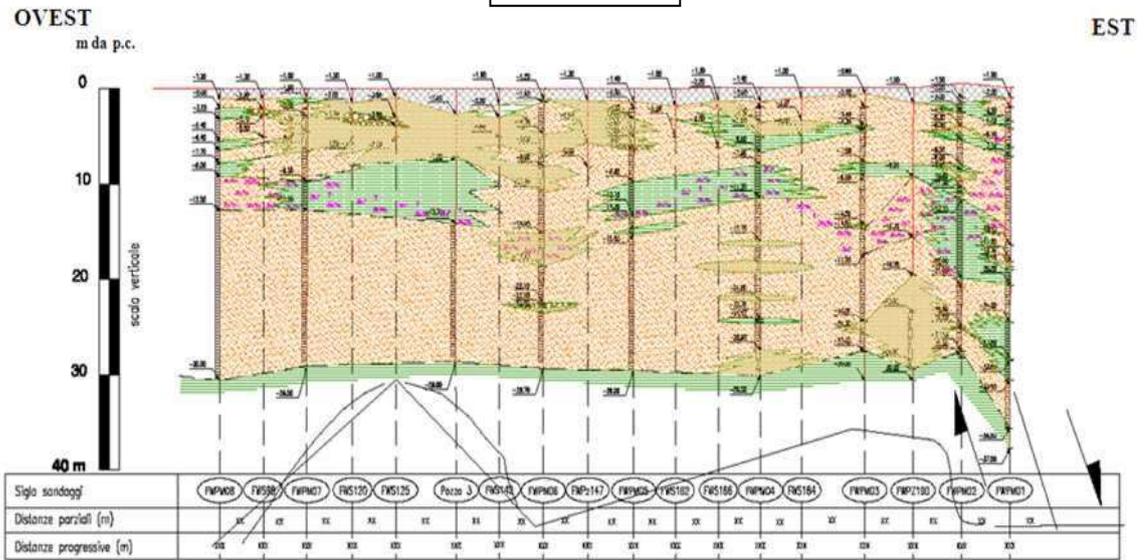
SEZIONE n°3



ALLEGATO 4 – TRACCIA E SEZIONE IDROGEOLOGICA N°1 LUNGO LA LINEA DELLA BARRIERA IDRAULICA DI 14 POZZI

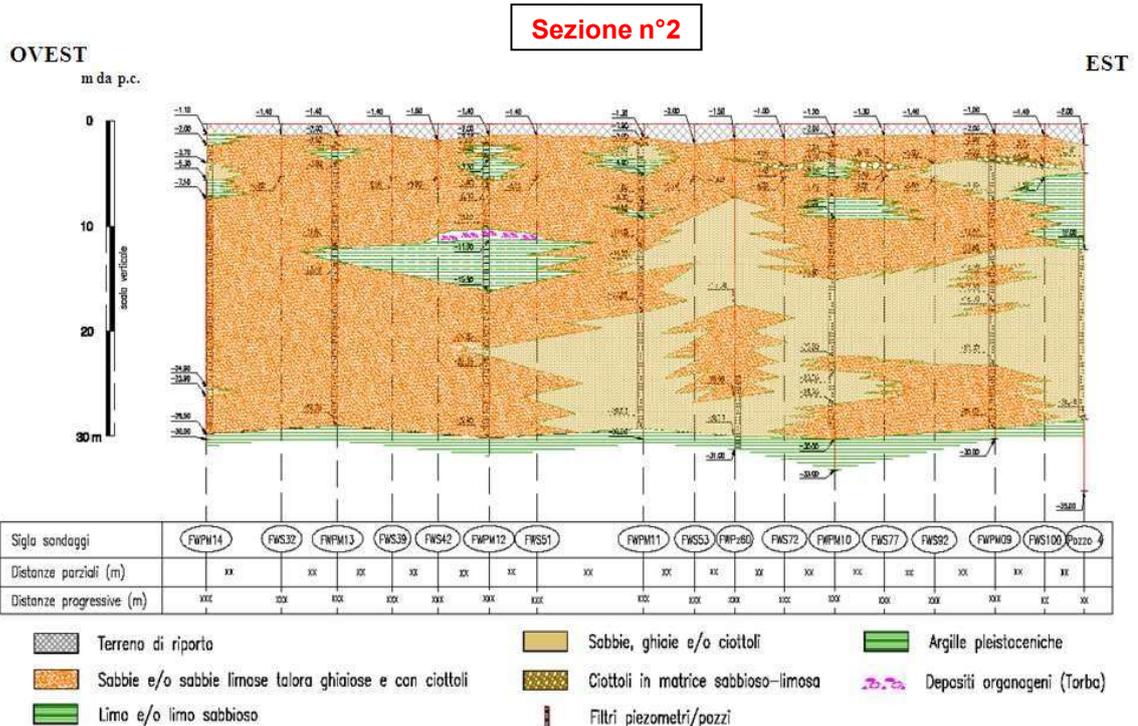
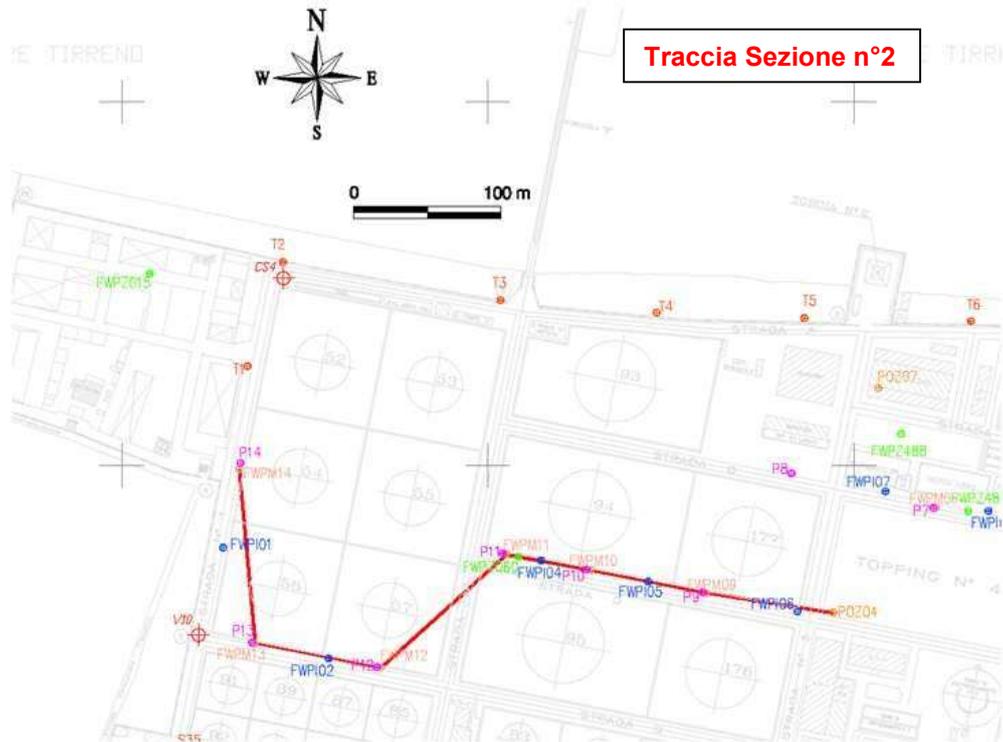


Sezione n°1



- LEGENDA:**
- Terreno di riporto
 - Sabbie e/o sabbie limose talora ghiaiose e con ciottoli
 - Limo e/o limo sabbioso
 - Sabbie, ghiaie e/o ciottoli
 - Ciottoli in matrice sabbioso-limosa
 - Filtri piezometri/pozzi
 - Argille pleistoceniche
 - Depositi organogeni e resti conchigliari

ALLEGATO 5 – TRACCIA E SEZIONE IDROGEOLOGICA N°2 LUNGO LA LINEA DELLA BARRIERA IDRAULICA DI 14 POZZI



Ringraziamenti

È per me doveroso ringraziare innanzitutto il Prof. Marco Barla e l'Ing. Matteo Baralis per l'attenzione e la premura con cui mi hanno accompagnato nell'approfondimento degli argomenti trattati e nella stesura della tesi.

È altrettanto doveroso ringraziare la Raffineria di Milazzo e la Società Wood Amec Foster Wheeler Italiana S.r.l. - Environmental Division per avermi dato la possibilità di operare presso le loro aziende, con la costante e professionale collaborazione del Dott. Davide Gori e dell'Ing. Dario Sardano.

Il ringraziamento più silenzioso e più sentito è naturalmente dedicato alla mia famiglia che mi ha sempre supportato e sopportato, rendendo una festa ogni mio ritorno a casa.

Grazie in particolare a voi, mamma e papà, per l'amore infinito che mi regalate ogni giorno. Mi avete insegnato a camminare da sola senza mai perdermi d'occhio, permettendomi di comprendere l'importanza dell'indipendenza e allo stesso tempo della famiglia.

Senza di voi Anna e Ciccio (e il nostro Lillo) la mia famiglia non sarebbe mai stata così speciale. L'affetto che ci unisce ci permette di continuare a crescere insieme nonostante ci troviamo da molto tempo distanti. Grazie anche a te Emanuele per essere, con i tuoi preziosi consigli, come un fratello maggiore.

Un ringraziamento speciale è dedicato ai miei amici e colleghi con cui ho condiviso ogni momento di questi anni e che mi hanno insegnato che è possibile sentirsi a casa anche quando da casa si è lontani.

In particolare grazie a te Mela, per esserci sempre stata da quando io riesca a ricordare. Grazie per la tua amicizia sincera e rassicurante, per i messaggi vocali che mi hanno fatto compagnia e per gli abbracci silenziosi che non sono mai mancati ogni qualvolta ne avessi bisogno.

Grazie Salvo, compagno d'avventura dal primo giorno in cui ci siamo incontrati all'ultimo esame, dal Poli ai mesi dell'Erasmus trascorsi a Granada. Grazie per le ansie e le vittorie condivise, per non avermi mai fatto sentire da sola e per aver sopportato i miei sbalzi d'umore. Grazie, soprattutto, per avermi aspettato ad ogni esame fuori dalla porta.

Grazie Marco, per avermi permesso di capire che l'amicizia, quella vera, non ha bisogno di tempi e momenti predefiniti. Grazie per esserci stato e per esserci

ancora, per l'affetto illimitato che riesci a dimostrarmi sempre, in ogni circostanza, senza chiedere nulla in cambio.

Grazie a voi Stefania, Manuel, Elisa, Roberto e Antonio, per tutto quello che abbiamo condiviso e per i momenti che ancora ci aspettano, per aver rappresentato per me, in questa avventura, ciascuno a suo modo, un punto di riferimento.

Infine grazie a te Giorgio, per avermi tenuto per mano in questi anni.