

Ottimizzazione delle caratteristiche dimensionali di una trincea drenante in un sito industriale costiero dismesso

A cura di [Giovanni Formentin](#), Tethys s.r.l.

Indice

1	Introduzione.....	2
2	Caratteristiche e struttura idrogeologica dell'area.....	2
3	Struttura del modello matematico	3
4	Rappresentazione della trincea drenante.....	6
5	Ottimizzazione di quota ed estensione della trincea.....	9
5.1	Valutazione della quota di posa della trincea	9
5.1.1	Superficie delle aree allagate	9
5.1.2	Variazione delle aree di richiamo	10
5.2	Valutazione dell'estensione della trincea.....	15
5.3	Contestuale approfondimento e riduzione dell'estensione della trincea.....	17
6	Conclusioni.....	18
	Bibliografia	19

1 Introduzione

Viene di seguito presentato uno studio svolto a supporto delle attività di messa in sicurezza e di risanamento di un sito contaminato.

Lo studio è stato rivolto in particolare a evidenziare come il corretto dimensionamento di una trincea di drenaggio possa apportare sensibili miglioramenti all'efficacia degli interventi con scelte non costose e spesso addirittura vantaggiose sotto gli aspetti dei costi e del rendimento. Nel caso in esame, è stata valutata l'influenza delle caratteristiche dimensionali della trincea drenante rispetto al richiamo delle acque di falda e dell'acqua di mare proveniente dalla laguna prospiciente.

Gli obiettivi dell'intervento sono i seguenti:

- Impedire il deflusso delle acque di falda verso la laguna;
- minimizzare la possibilità di allagamento di alcune porzioni dell'area, fenomeno che si determina, anche in assenza di marginamento, in occasione di precipitazioni abbondanti;
- minimizzare il richiamo di acqua di mare verso la trincea.

In riferimento a tali necessità, l'attività ha avuto lo scopo di valutare l'effetto dell'estensione e della quota di base della trincea sulla superficie delle aree allagate in occasione di precipitazioni abbondanti e sulla portata di acqua di mare richiamata.

L'attività è stata svolta mediante un modello di flusso densità-dipendente realizzato tramite il codice di calcolo SEAWAT (Langevin et al., 2008).

2 Caratteristiche e struttura idrogeologica dell'area

L'area di studio è prospiciente ad una laguna e comprende un ex stabilimento di estensione di circa 10 ha ed alcune aree adiacenti occupate da aree a verde e bacini di colmata.

L'area di studio è stata investigata mediante l'esecuzione di indagini dirette (sondaggi e piezometri) ed indirette.

La successione stratigrafica, dall'alto verso il basso, è così composta (vedi anche la Figura 1):

- livello superficiale (A) costituito da materiale di riporto di origine naturale o antropica con granulometria da sabbiosa ad argillosa e distribuzione eterogenea, avente spessore di 2-3 m; il livello è localmente impregnato dalle acque di origine meteorica;
- livello sedimentario di ambiente transazionale (B), costituito da limi argillosi localmente sabbiosi ed argille limose, presente fino a circa 7-8 m da p.c.. Il livello svolge un ruolo di aquiclude separando il livello superficiale (A) dalle alluvioni sottostanti;
- alluvioni recenti (C1-C3), costituiti dall'intercalazione frequente di depositi sabbiosi, limosi e limoso-argillosi e di spessore via via maggiore spostandosi da est ad ovest;
- calcare cavernoso (D), rinvenuto a circa 70 m di profondità dal piano campagna. Le stratigrafie di alcuni sondaggi mostrano che il calcare è anticipato da un livello detritico a granulometria prevalentemente ghiaiosa in matrice limosa dello spessore di qualche metro. Il calcare cavernoso è dotato di buone capacità di conduzione idraulica,

soprattutto a causa dell'elevata permeabilità secondaria legata alla

presenza di ampi fenomeni carsici e cavità naturali.

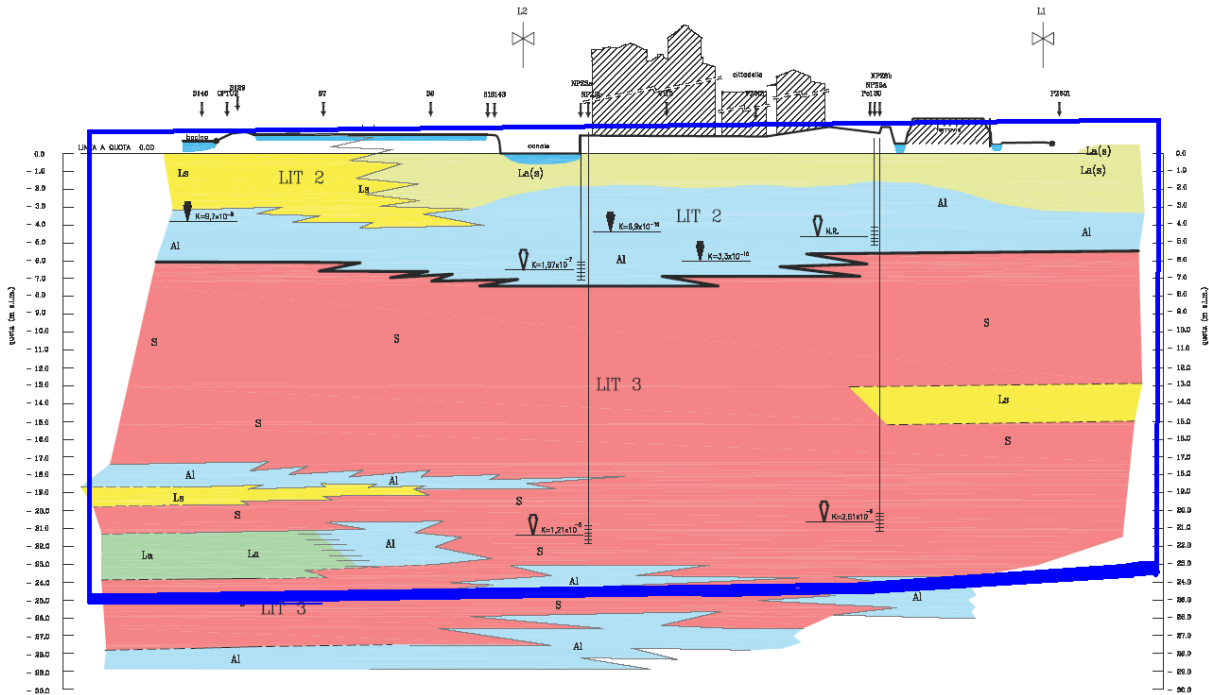


Figura 1 – Sezione idrogeologica dell'area di studio.

3 Struttura del modello matematico

La contiguità dell'area di studio con la laguna e la vicinanza con il mare hanno reso necessario impostare un modello di flusso, accoppiato ad un modello densità-dipendente che tenga conto dell'influenza che la concentrazione salina ha sulla densità e, quindi, sul movimento dell'acqua.

La scelta è ricaduta su SEAWAT 2000, codice di calcolo densità-dipendente sviluppato dal Servizio Geologico statunitense (U.S.G.S.,

2002). SEAWAT si basa sull'utilizzo iterativo di MODFLOW per la simulazione del flusso e MT3D per la simulazione del trasporto salino e risolve l'equazione di conservazione della massa e l'equazione di Darcy con densità del fluido variabile. L'interfaccia grafica utilizzata per la costruzione del modello è Groundwater Vistas 5, sviluppata dalla ESI – Environmental Simulations Incorporated.

La griglia di discretizzazione è stata orientata secondo la direzione principale di deflusso, ha dimensioni pari a 2800 X 2400 metri ed è costituita da 183 righe e 254 colonne. L'area di interesse è stata rappresentata mediante

un raffittimento della griglia, come si vede in Figura 2.

Lungo la direzione verticale è stata interessata una profondità variabile da pochi metri fino a circa 25 metri da piano campagna al di sotto della laguna. Oggetto del modello è quindi la porzione stratigrafica interessata dal primo livello superficiale e dalla prima porzione acquifera costituita da sabbie con intercalazioni più fini. Il dominio è stato discretizzato mediante l'introduzione di otto layer, suddivisi in questo modo:

- layer 1: primo livello superficiale (A), costituito in parte da materiale di riporto, specialmente nella zona adiacente all'ex sito industriale, ed in parte da materiale di origine naturale a granulometria fine;
- layer 2, 3: aquiclude (B) rinvenuto fino a circa 8 metri da p.c.;
- layer 4 – 8: acquifero sabbioso (C); il layer 6 rappresenta due lenti limoso-argillose (C2) rinvenute a profondità differenti e rappresentate tramite un layer a geometria variabile.

La suddivisione in otto layer è stata necessaria al fine di garantire spessori limitati in ogni layer. Tale accorgimento è indispensabile in caso di simulazioni densità-dipendenti, per le quali la direzione di migrazione verticale è preponderante.

Dagli studi disponibili si desume che non vi sia presenza, fino alla massima profondità d'indagine (circa 50 metri da p.c.), di livelli di materiali fini continui su tutta l'area di

studio. La base del modello è stata quindi posizionata a circa 25 metri di profondità dal piano campagna, ad una quota tale da consentire di simulare la porzione acquifera di interesse. La profondità è variabile a seconda del rinvenimento di livelli fini che si ritiene abbiano, come effetto, quello di convogliare il deflusso sotterraneo secondo una direzione quasi orizzontale. Tale assunto è sufficiente a consentire di impostare una condizione di scambio di flusso nullo alla base del modello. Come buona parte delle assunzioni che vengono formulate nell'ambito della costruzione di un modello matematico come quello in oggetto, anche questa può essere soggetta a revisione qualora ne sia resa evidente la necessità attraverso l'analisi di ulteriori dati di campo oppure la simulazione degli interventi di bonifica.

Le condizioni al contorno inserite rappresentano la piezometria di monte (condizioni di carico costante), la laguna (condizioni di carico equivalente nel primo layer e lungo l'intero spessore del modello in corrispondenza del limite di valle) e la ricarica, valutata calcolando l'infiltrazione tramite il metodo di Thornthwaite (Thornthwaite, 1948).

La permeabilità è stata stimata in sede di calibrazione, avvalendosi del codice PEST (Doherty et al., 2010).

La distribuzione delle concentrazioni di sale nel modello calibrato in condizioni stazionarie è rappresentata in Figura 4.

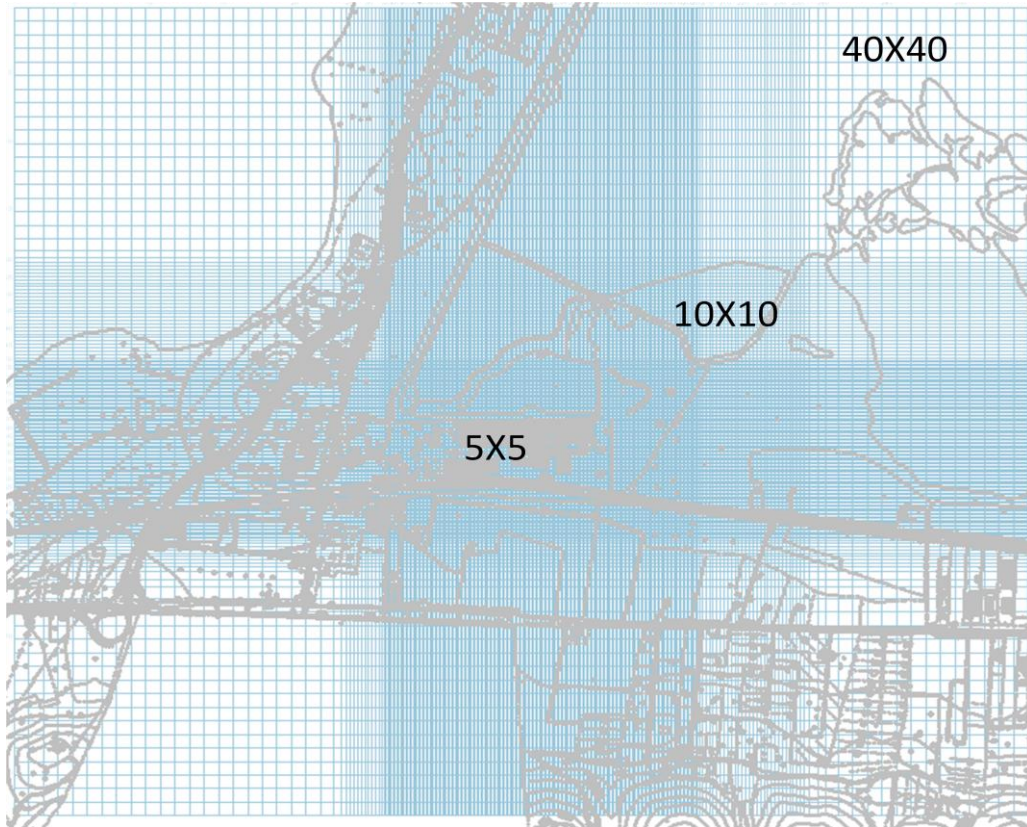


Figura 2 – Griglia di calcolo – vista in pianta. Le dimensioni delle celle sono in metri.

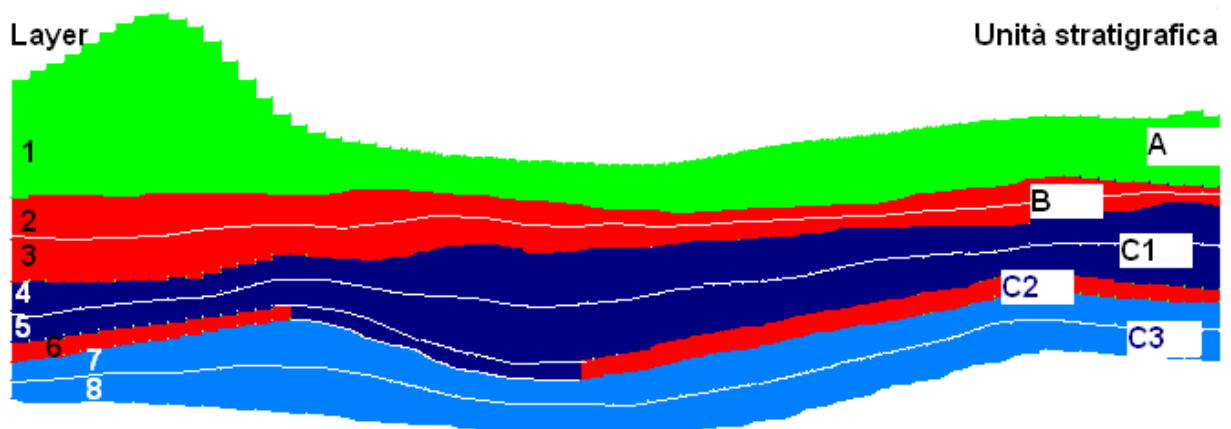


Figura 3 – Suddivisione verticale della griglia di calcolo.

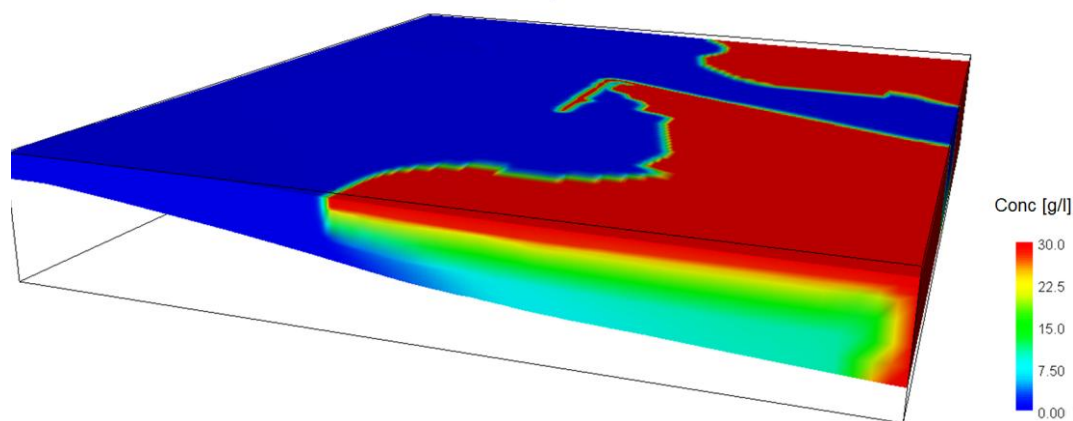


Figura 4 - Concentrazione salina in condizioni indisturbate.

4 Rappresentazione della trincea drenante

A seguito dei risultati delle attività di caratterizzazione ambientale ed al fine di prevenire il deflusso verso la laguna delle acque sotterranee contenute nei materiali di riporto, nel progetto definitivo di bonifica è stata prevista la realizzazione di un intervento di marginamento fisico che interessi l'intero spessore del livello superficiale, integrato da un sistema di drenaggio delle acque di accumulo.

L'intervento previsto consiste nell'installazione di un marginamento fisico costituito da palancole metalliche tipo Larssen infisse fino ad una profondità massima di 7 m da p.c. e giuntate con l'ausilio di materiali idonei a garantire un'elevata tenuta idraulica. Immediatamente a tergo del marginamento è prevista l'installazione di un sistema di drenaggio finalizzato al recupero delle acque sotterranee che si accumulano entro il livello superficiale.

Il sistema è costituito da una tubazione in HDPE filtrata, immersa in ghiaia e dotata di

leggera pendenza in modo da convogliare le acque drenate verso i pozzetti di raccolta, ubicati a distanze indicative di 100 metri. Il sistema è posizionato immediatamente a tergo delle palancole metalliche e ad una profondità da p.c. di circa 1,5 metri. Una sezione-tipo del sistema integrato è riportata in Figura 5.

La disposizione del sistema integrato è riportata in Figura 5.

La portata d'acqua che raggiunge il sistema di drenaggio è stata calcolata come somma dei contributi dati dal deflusso sotterraneo e dalle precipitazioni occorrenti sull'area rappresentata nel dominio.

Il sistema di marginamento fisico fronte-laguna è stato simulato mediante l'attribuzione, alle celle del modello ubicate lungo l'allineamento previsto dal Progetto definitivo di bonifica, di condizioni di *horizontal-flow barrier* (Harbaugh et al., 2000).

La condizione è definita mediante l'attribuzione di uno spessore ed una conducibilità idraulica, le quali vengono poi utilizzate nell'ambito del calcolo della conduttanza tra le due celle separate dalla barriera.

Le assunzioni alla base del pacchetto sono una capacità di immagazzinamento ed uno spessore trascurabili rispetto alle dimensioni delle celle nelle quali la condizione viene applicata.

Le modalità di impostazione e le variabili di controllo dell'HFB (spessore e conducibilità idraulica della barriera) sono stati impostati

in relazione ai caratteri costruttivi definiti nell'ambito del Progetto definitivo di bonifica.

La condizione è stata applicata alle celle del primo e del secondo layer (Figura 6). Tale soluzione è stata adottata al fine di rappresentare il marginamento coerentemente con la sua disposizione nella porzione centrale dell'aquiclude (litotipo B), intestandolo alla base del layer 2.

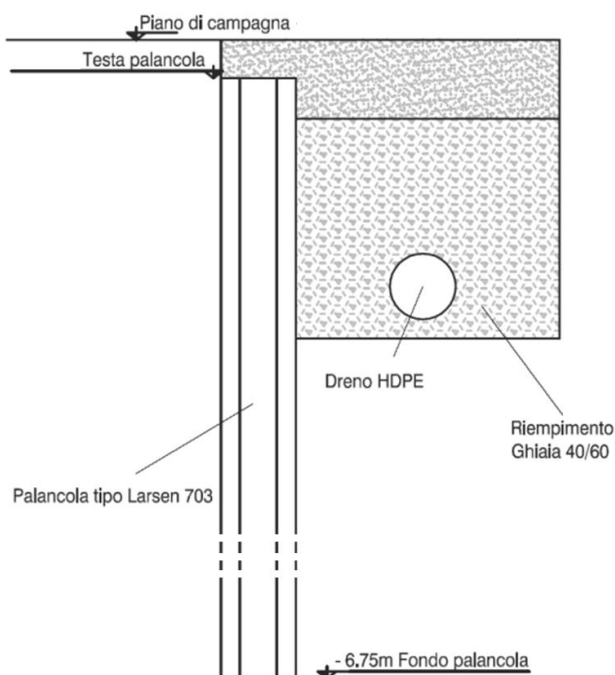


Figura 5 - Sezione-tipo di realizzazione del sistema marginamento - dreno. Il riempimento drenante è sovrastato da una copertura impermeabile al fine di evitare l'afflusso di acque di ruscellamento superficiale. La quota di base della trincea drenante è stata definita tramite le simulazioni descritte di seguito.

Il sistema di drenaggio tergale è stato simulato mediante la condizione al contorno di tipo DRAIN (Harbaugh et al., 2000) lungo un allineamento di celle poste a monte della barriera di marginamento fisico simulata (circa 5 m). Lo "stage" del dreno (la quota sotto alla quale, nel modello, la condizione drain è disattiva) e la quota di base della

trincea sono state inserite ad una profondità iniziale variabile tra 1,5 e 2 m da p.c. rispettivamente. Entrambi i valori sono stati poi modificati al fine di ottemperare agli obiettivi elencati in Capitolo 1. La configurazione finale adottata è rappresentata in Figura 7.

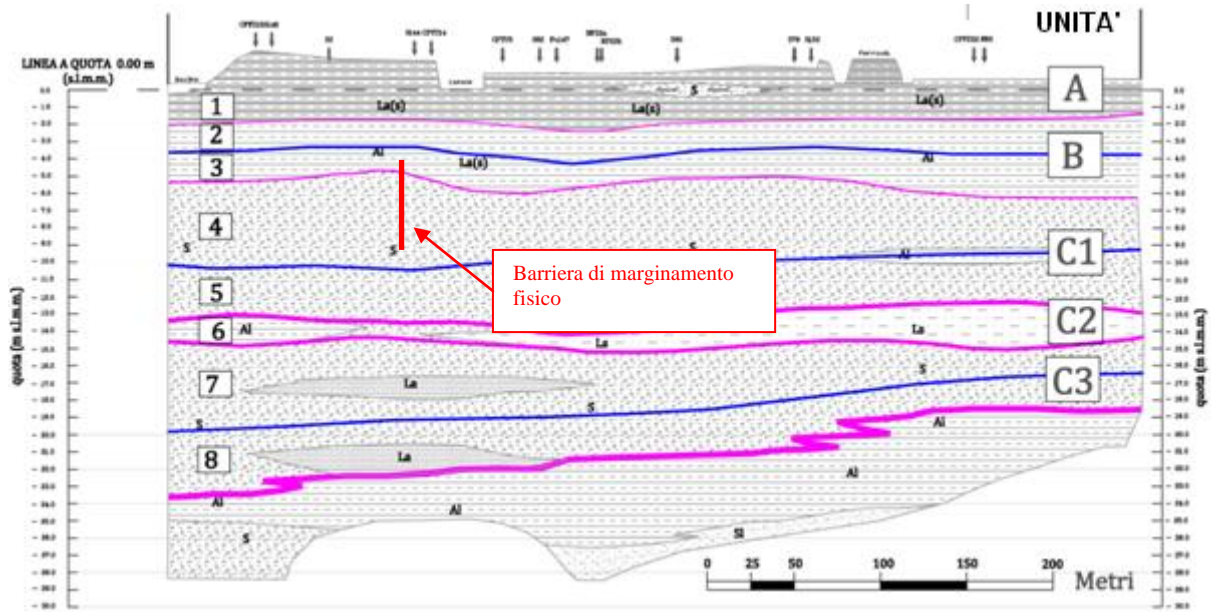


Figura 6 - Rappresentazione della barriera di marginamento fisico in sezione. La barriera si intesta al limite tra 2° e 3° layer del modello, all'interno del litotipo B.

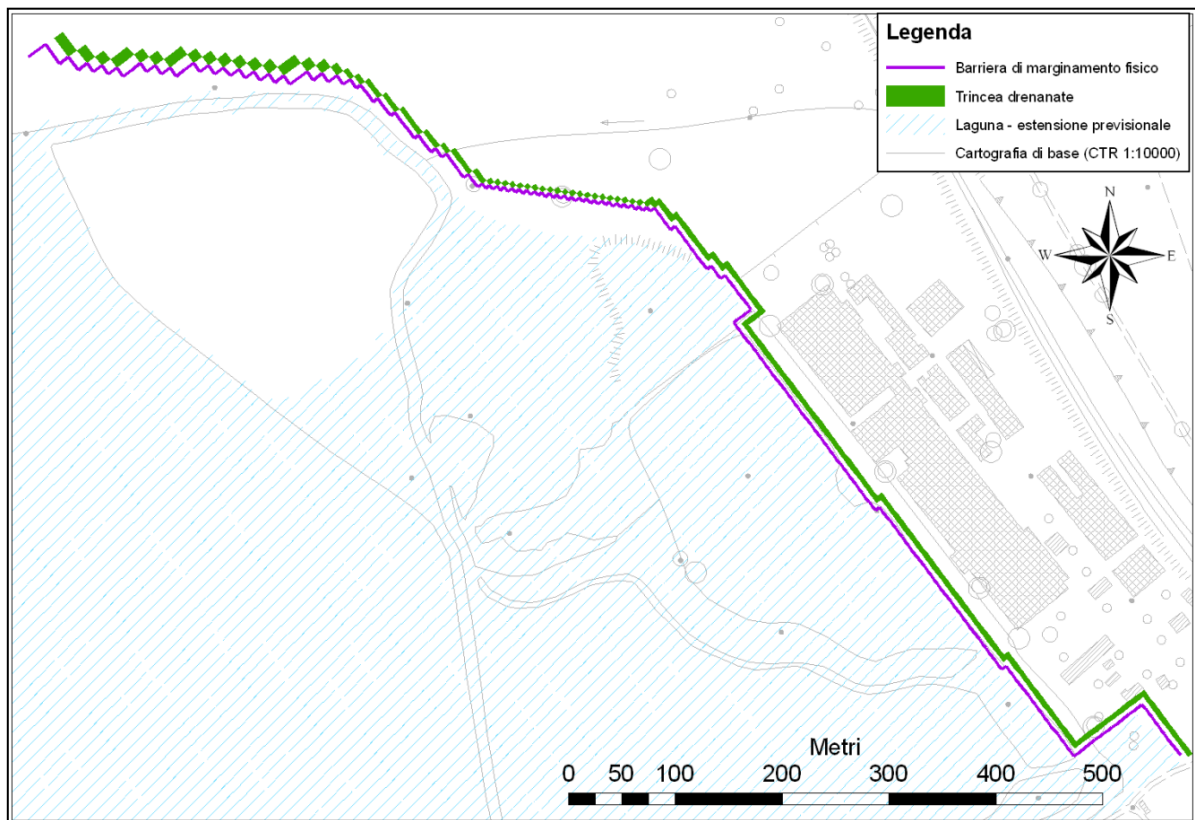


Figura 7 - Disposizione della barriera di contenimento fisico e della trincea drenante simulati all'interno del modello matematico.

5 Ottimizzazione di quota ed estensione della trincea

È stato sviluppato uno scenario in condizioni transitorie di durata totale pari a tre anni. Durante il primo anno, sono state mantenute le condizioni al contorno invariate stimate in sede di calibrazione. Al giorno n. 365 dall'inizio della simulazione, è stato rappresentato un evento meteorico eccezionale, costituito da una precipitazione di durata pari a 24 ore con intensità determinata dalla linea segnalatrice di possibilità pluviometrica per durata di 24 ore e tempo di ritorno di 25 anni. L'evento simulato determina una precipitazione totale pari a 134 mm. Durante il periodo successivo sono state riprese le condizioni al contorno di simulazione.

Partendo da tale scenario, sono state eseguite alcune simulazioni finalizzate a definire nel dettaglio la migliore posizione plano-altimetrica in cui impostare la trincea drenante.

5.1 Valutazione della quota di posa della trincea

Sono state eseguite tre simulazioni modificando la condizione di tipo DRAIN mediante impostazione di "stage" differenti, purché sempre all'interno del livello idrogeologico superficiale.

In corrispondenza di alcuni tratti, l'approfondimento della trincea è reso impossibile dalla presenza di un livello di acquiclude che separa il livello superficiale dal primo acquifero. Per ovviare a tale inconveniente, in tali tratti la quota del dreno è stata innalzata al fine di mantenerlo all'interno del livello superficiale, evitando di attraversare l'aquiclude. Il risultato di tale impostazione è rappresentato in Figura 8.

Le tre simulazioni corrispondono alle seguenti configurazioni:

- a) dreno a -1 m s.l.m. (corrispondente alla profondità di progetto di 1,5 m da p.c.);
- b) dreno a -2 m s.l.m. (dove necessario intestato a -1,5 m s.l.m.);
- c) dreno a -3 m s.l.m. (dove necessario intestato a -2 e -1,5 m s.l.m.).

5.1.1 Superficie delle aree allagate

La superficie delle aree allagate è stata valutata immediatamente al termine dell'evento di pioggia (al termine del giorno n. 365), in cui si osserva la massima estensione. Il risultato, per ciascuna delle profondità a cui è impostato il dreno, è riportato in Figura 9.

L'approfondimento del dreno rispetto alla quota di progetto determina una marginale diminuzione dell'estensione delle aree allagate. L'area immediatamente a monte dei corpi di fabbrica subisce un incremento di estensione molto limitata. Si deve poi tenere conto che la zona a monte dell'area dei fabbricati è attraversata da un sistema di drenaggio superficiale (non rappresentato all'interno del modello) che facilita l'evacuazione delle acque e lo smaltimento in mare. La riduzione dell'allagamento interessa particolarmente una vasta area che è comunque già soggetta, almeno stagionalmente, ad allagamenti.

Gli effetti provocati dall'approfondimento della trincea non sono proporzionali alla quota stessa: intestare il dreno a -3 m s.l.m. non determina riduzioni consistenti nella superficie allagata rispetto alla soluzione con dreno a -2 m s.l.m.

In conclusione, la differenza tra le superfici allagate nei differenti scenari appare talmente limitata da non rendere necessaria la valutazione dei tempi di allagamento.

5.1.2 Variazione delle aree di richiamo

Al fine di valutare il richiamo di acqua operato dal dreno, sono state confrontate, per ogni simulazione

- le concentrazioni di sali estratte dal dreno
- le direzioni dei vettori di flusso nell'intorno del dreno stesso

nella situazione a regime, prima dell'evento meteorico (quindi al giorno n. 364 dall'inizio della simulazione).

Per quanto riguarda la concentrazione di sali si può notare, osservando i grafici di Figura

10 e Figura 11, come l'approfondimento del dreno provoca un leggero incremento della concentrazione salina estratta. L'aumento è più marcato agli estremi della barriera ed in particolare nella porzione terminale di sud-est, in cui le concentrazioni passano da 3 g/l (con dreno alla quota di progetto) a 6,8 g/l (con dreno a -2 m s.l.m.) e 8,7 g/l (con dreno a -3 m s.l.m.). Nella porzione nord-ovest invece le concentrazioni variano da 14,1 g/l (con dreno alla quota di progetto) a 17,8 g/l (con dreno a -2 m s.l.m.) e 19,1 g/l (con dreno a -3 m s.l.m.).

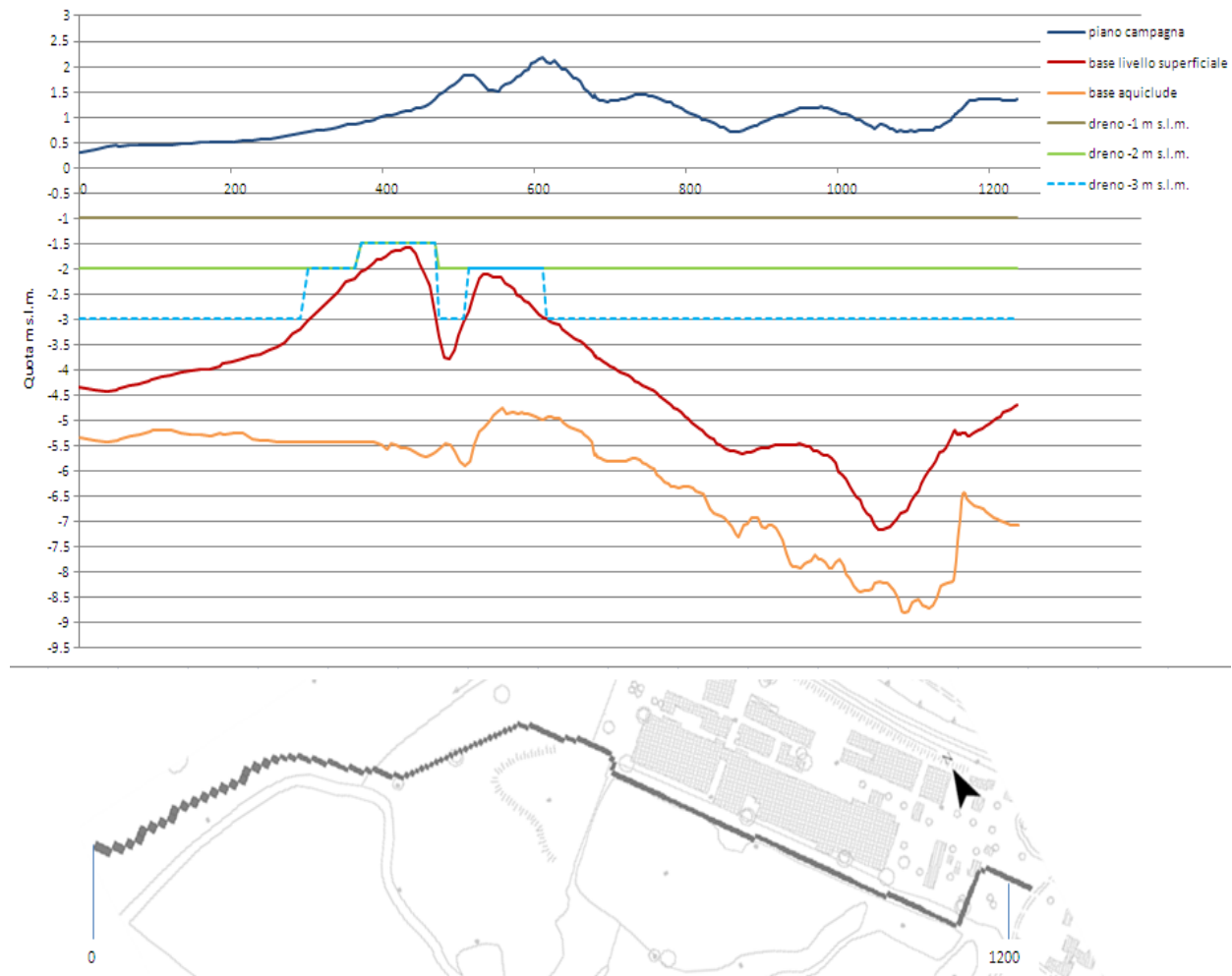


Figura 8 - Profilo altimetrico, da NO a SE lungo il dreno, con indicazione dell'andamento del piano campagna, della base del livello superficiale e della base dell'aquiclude.

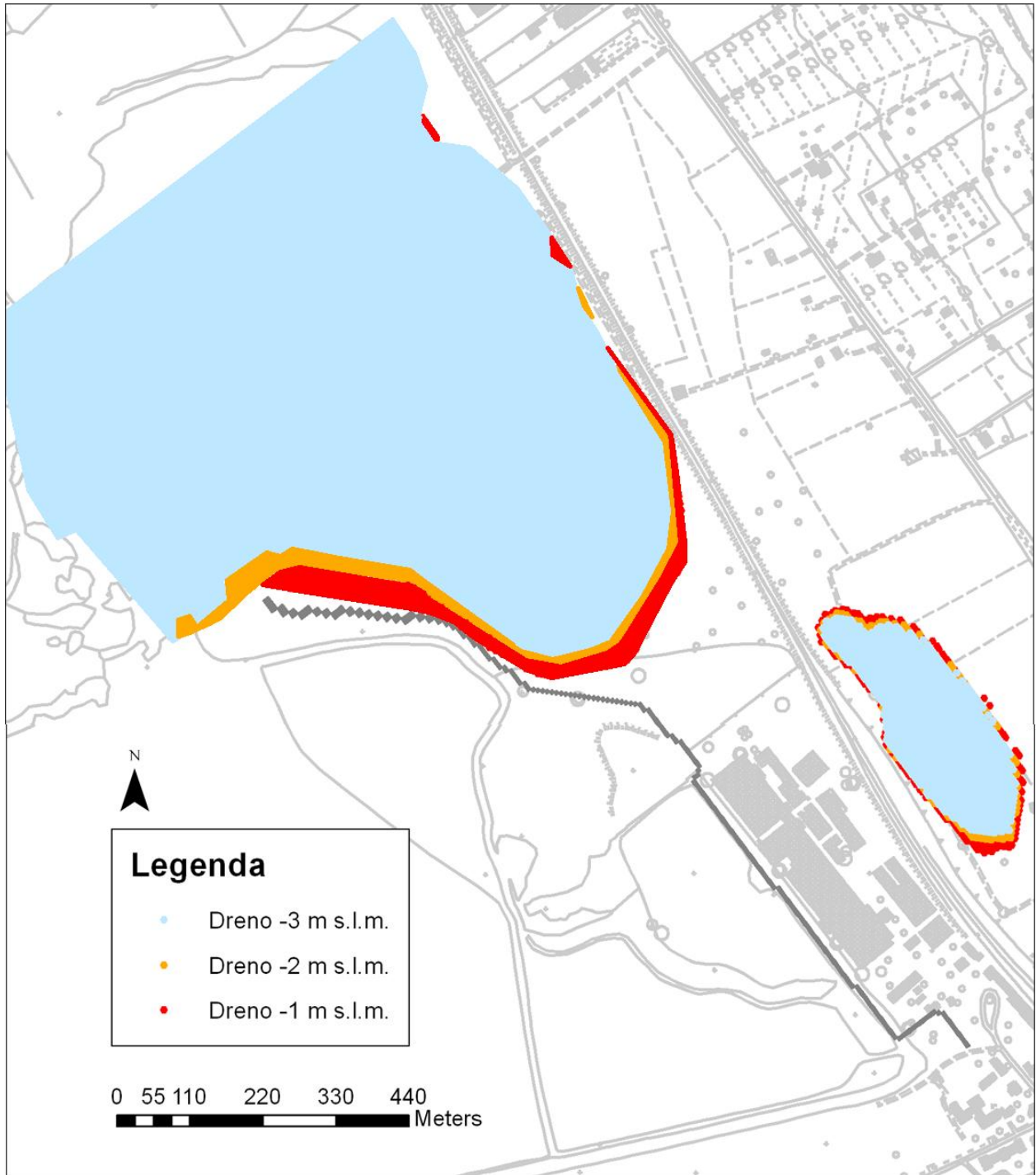


Figura 9 - Aree zone allagate per ogni simulazione.

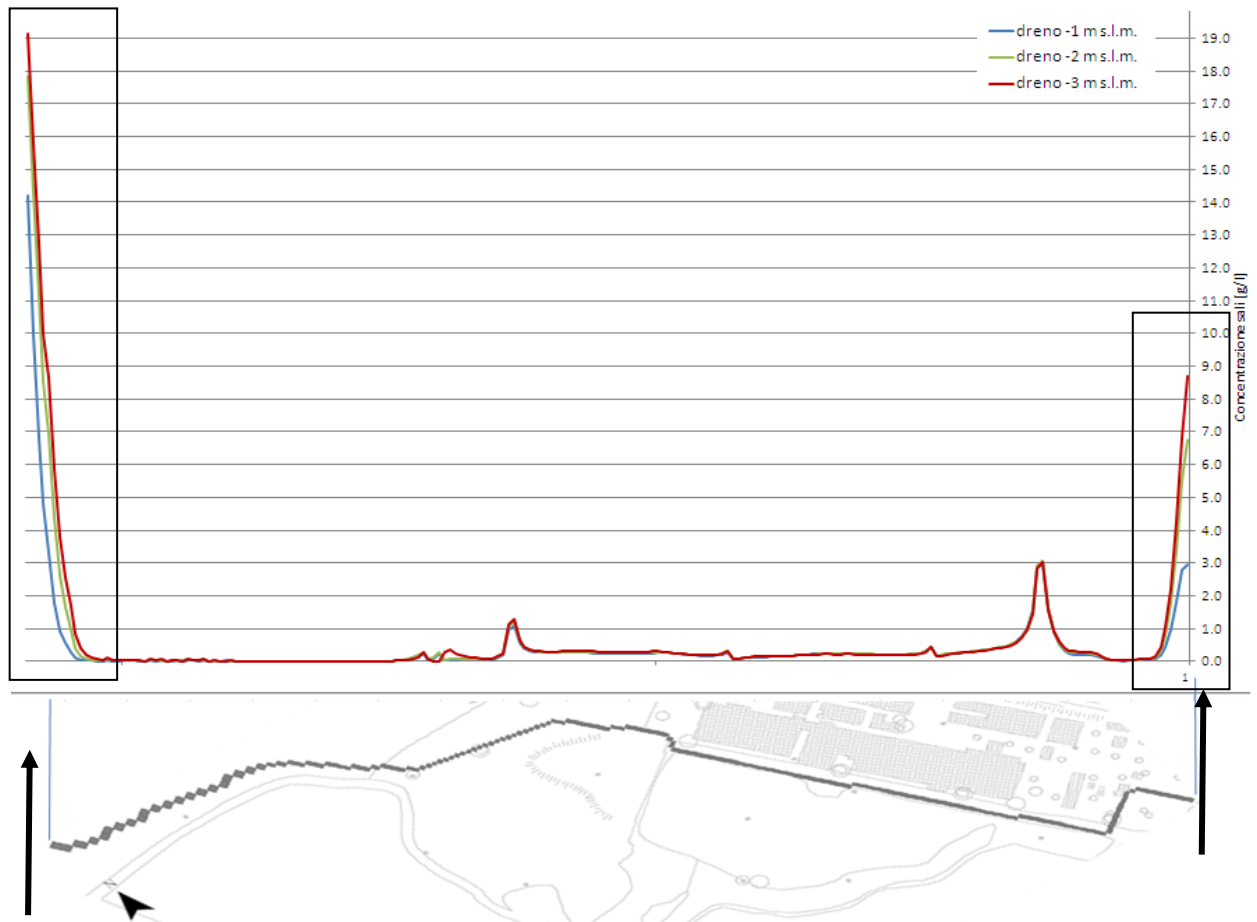


Figura 10 - Andamento della concentrazione di sali lungo il profilo del dreno per ogni simulazione – situazione a regime (t = 364 g dall’inizio della simulazione). Le aree nei riquadri sono ingrandite in e Figura 11.

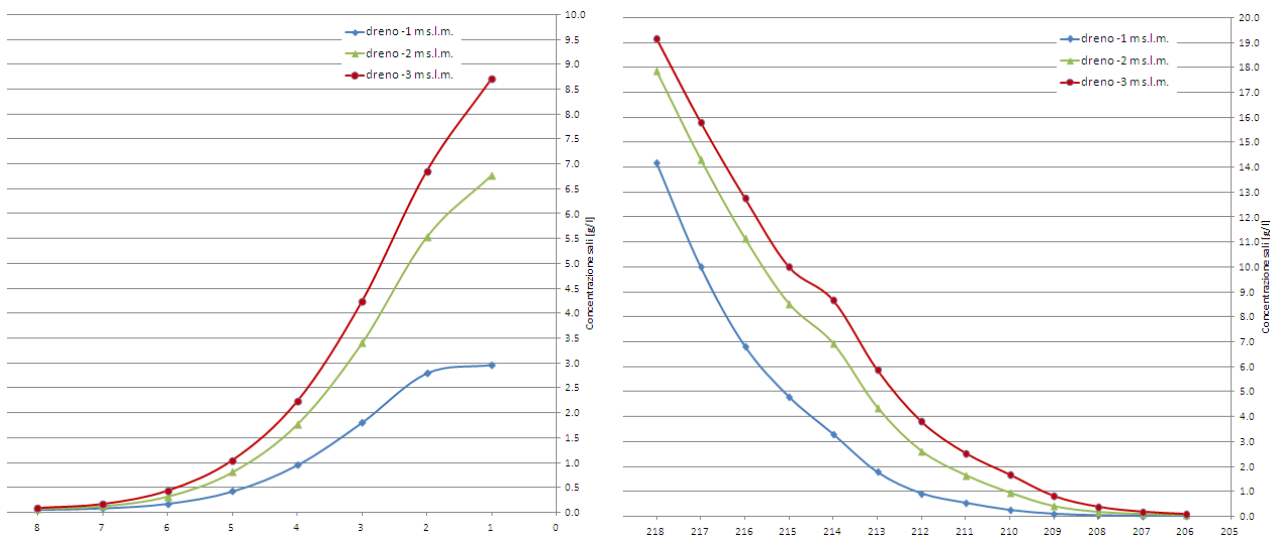


Figura 11 - Andamento della concentrazione salina delle acque richiamate dal tratto terminale di sud-est del dreno (a sinistra) e dal tratto terminale di nord-ovest del dreno (a destra).

L'influenza del dreno sulle direzioni di deflusso all'interno dell'acquifero superficiale è stata valutata osservando l'andamento dei vettori di flusso per le simulazioni con il dreno intestato a -1 m s.l.m. e a -3 m s.l.m.

In Figura 12 sono mostrati i vettori di flusso all'interno del livello superficiale. Le direzioni di deflusso sono simili in entrambe le simulazioni, ad eccezione di una ristretta area lungo il limite settentrionale (rappresentata in Figura 12) in cui si può notare che l'approfondimento del dreno determina un incremento del deflusso proveniente dalle aree lagunari a nord. Ne consegue un incremento della portata afferente al dreno.

L'incremento del richiamo di acque da laguna conseguente all'approfondimento della quota della trincea è confermato dalla vista in sezione mostrata in Figura 13: la linea di spartiacque che è possibile disegnare osservando i vettori-velocità calcolati dal modello, e che è determinata dal deflusso verso i due recettori (la trincea e la laguna),

avanza verso la laguna a seguito dell'approfondimento del dreno. Lo spostamento dello spartiacque deriva dall'aumento di richiamo di acqua dalla laguna verso la trincea. La portata richiamata passa da 0,8 mc/d a 3,5 mc/d. L'incremento è pari ad oltre tre volte rispetto al flusso richiamato dal dreno più superficiale.

All'approfondimento del dreno corrisponde una riduzione del flusso che raggiunge la laguna, in quanto il flusso proveniente dall'acquifero viene captato con maggiore efficacia dall'opera ubicata a -3 m s.l.m. Si tratta evidentemente della componente di deflusso di falda che, impostando il dreno a profondità di -1 m s.l.m., non viene richiamata dall'opera defluendo invece verso la porzione nord della laguna. La riduzione della portata che defluisce verso la laguna, pari a 2,1 mc/d, è paragonabile all'incremento di portata proveniente da laguna (2,7 mc/d), fenomeno che conferma l'inversione di flusso che si verifica nell'area in oggetto.

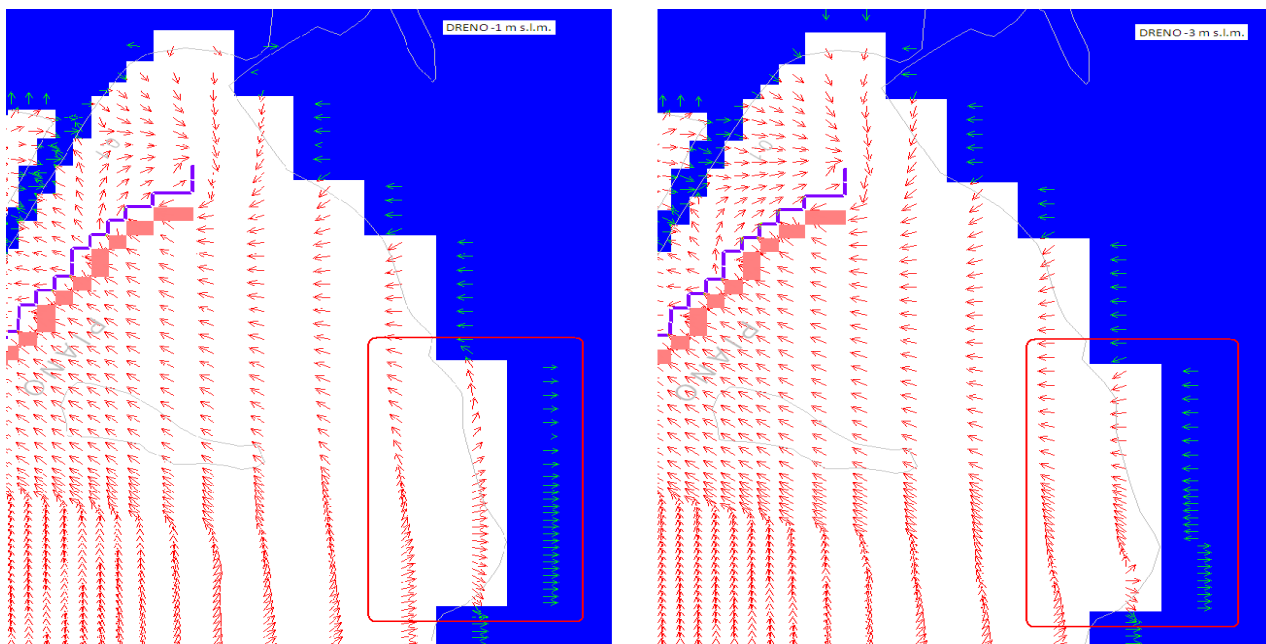


Figura 12 - Rappresentazione in pianta dei vettori di flusso per le simulazioni con dreno a -1 m s.l.m. (a sinistra) e a -3 m s.l.m. (a destra). L'area nel riquadro mostra le variazioni più marcate nelle direzioni di deflusso.

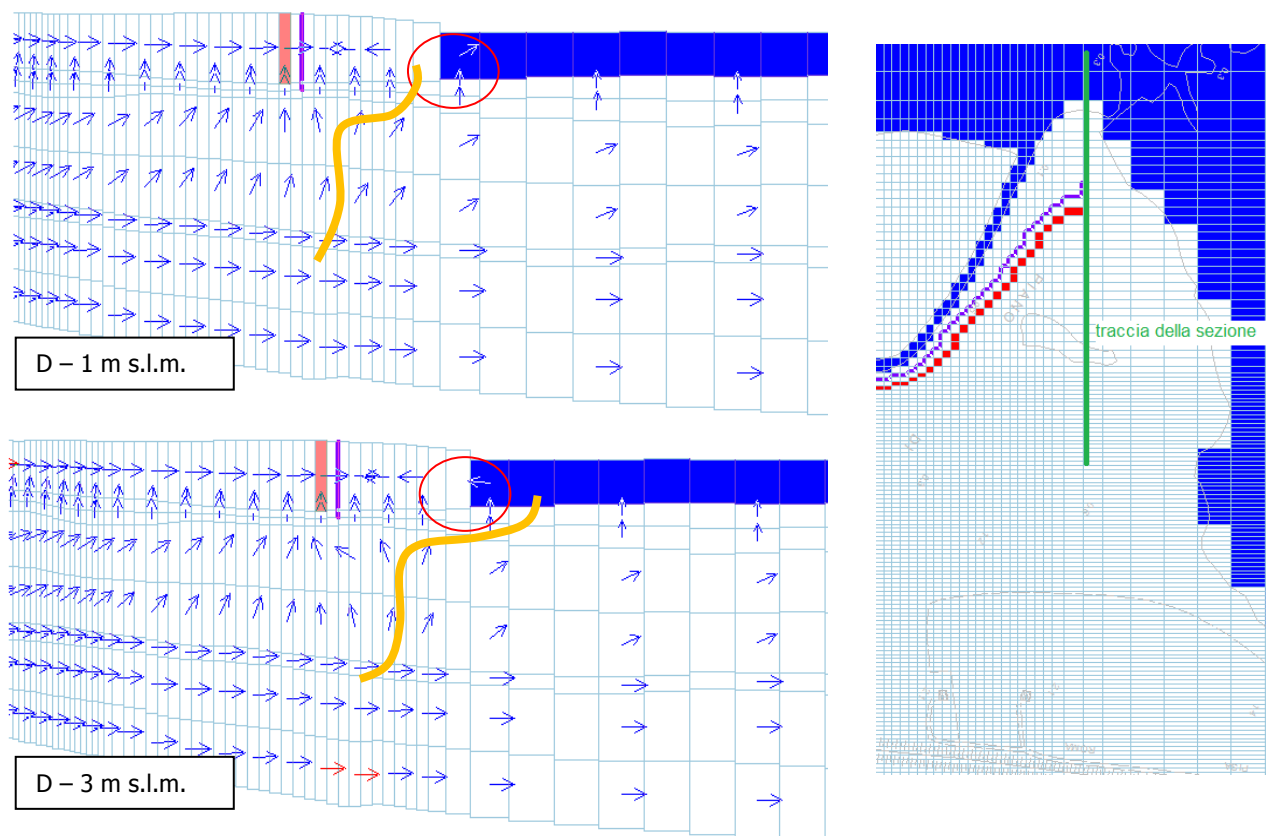


Figura 13 - Rappresentazione in sezione dei vettori di flusso per le simulazioni con dreno a -1 m s.l.m. (in alto) e a -3 m s.l.m. (in basso). La linea di spartiacque è rappresentata in colore arancione.

L'analisi del bilancio di massa all'interno del modello matematico mostra il richiamo di acqua operato dal dreno sulle porzioni acquifere più profonde. Pur mantenendosi entro valori contenuti, il richiamo è maggiore in corrispondenza dell'approfondimento del dreno fino a -3 m s.l.m. Il valore di portata drenata dai livelli sottostanti passa infatti, nello scenario di funzionamento a regime, da 25,6 mc/d a 30,4 mc/d, corrispondente ad un incremento di circa il 20%.

5.2 Valutazione dell'estensione della trincea

La norma nella realizzazione di interventi di marginamento fisico prevede che l'opera drenante affianchi la barriera lungo tutta la sua estensione. Nel caso in esame, è stato valutato l'effetto ambientale della riduzione di 100 metri dell'estensione della trincea all'estremo nord-ovest rispetto alla lunghezza del marginamento fisico.

La variazione proposta è finalizzata a ridurre il richiamo di acqua da laguna. Infatti è stato osservato come il caso in cui la trincea sia estesa fino all'estremo nord-ovest del marginamento, comporti un'azione di richiamo nei confronti delle acque di ingresso meteorico che si accumulano periodicamente in superficie a seguito dell'espansione dell'area di laguna. Una conferma dell'effettivo verificarsi di questo fenomeno proviene dalle osservazioni svolte

dal personale di sito, che testimoniano della presenza continuativa di ampie aree allagate nella porzione settentrionale del sito.

L'efficacia e l'operatività stessa dell'opera risulterebbero parzialmente compromesse dall'accumulo continuativo di acque superficiali, poiché si ridurrebbe sensibilmente la capacità di drenaggio delle acque sotterranee provenienti da monte. A tali inconvenienti si aggiungerebbe la parziale compromissione dell'efficacia derivante, in condizioni di livelli bassi, dal drenaggio di acque di laguna ad opera del tratto terminale della trincea. In un simile contesto, la riduzione di 100 metri dell'estensione della trincea riduce sensibilmente il richiamo di acqua da laguna senza compromettere gli obiettivi per cui l'opera viene realizzata.

Le simulazioni svolte mostrano come la riduzione dell'estensione comporta un incremento della possibilità di allagamento di una piccola superficie ubicata a ridosso della laguna (rappresentata mediante l'ovale azzurro in Figura 14). Data la posizione dell'area, già naturalmente soggetta ad allagamenti, e la posizione in pieno ambito lagunare, si ritiene che i vantaggi derivanti da una riduzione dell'opera siano tali da non giustificare il mantenimento dell'estensione fino al tratto originariamente previsto. Si osservi inoltre come i tempi di allagamento delle aree a seguito dell'evento di pioggia simulato risultano praticamente invariati.

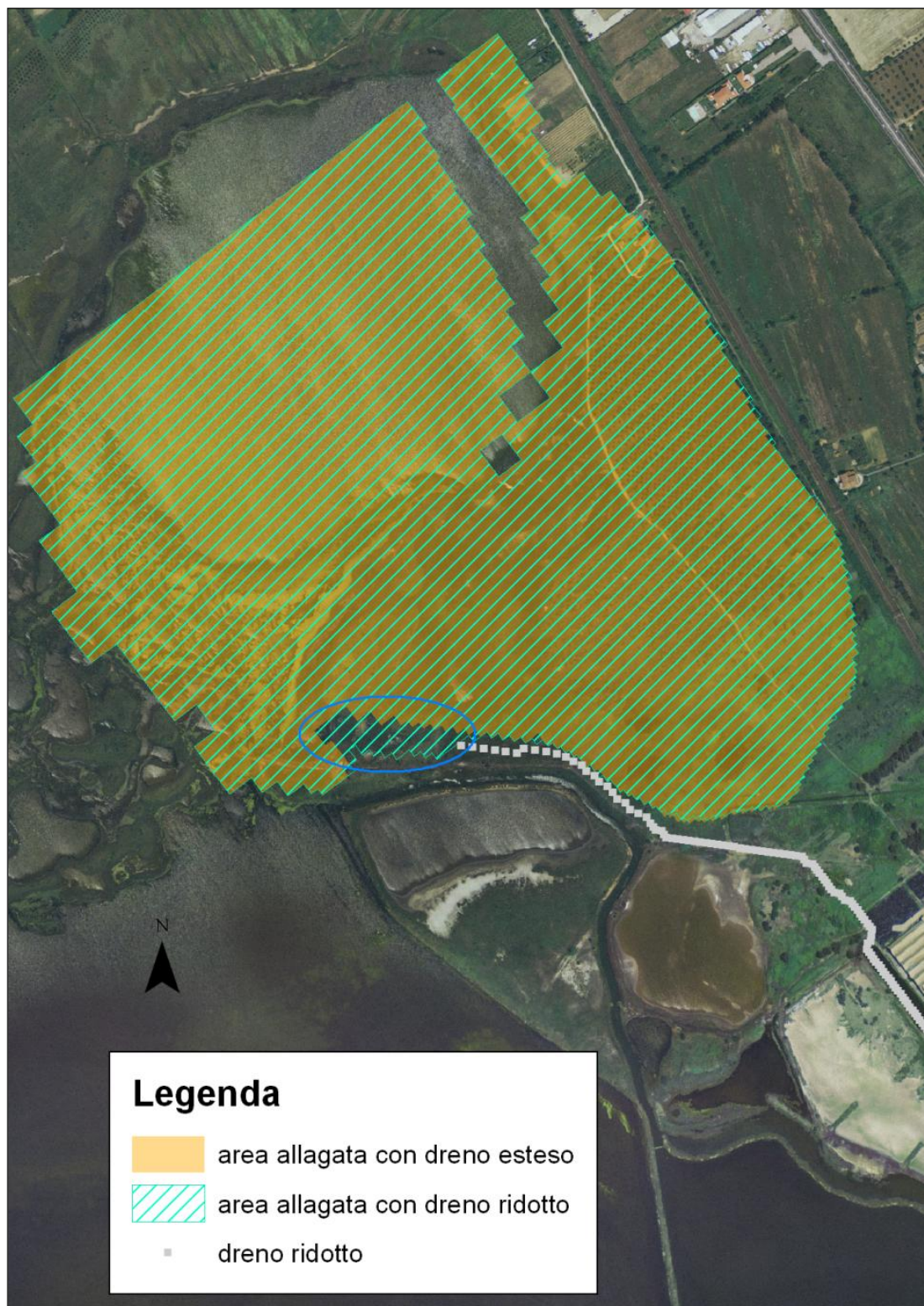


Figura 14 - Differenza delle celle allagate tra lo scenario di progetto (in arancione) e quello con il drenaggio ridotto (in azzurro barrato). Nell'ovale la zona in cui la riduzione del drenaggio provoca un maggior allagamento.

5.3 Contestuale approfondimento e riduzione dell'estensione della trincea

È stata infine esaminata la configurazione di deflusso derivante dalla contestuale riduzione della lunghezza del dreno e dal suo approfondimento fino a -3 m s.l.m. (Figura 15). Analogamente a quanto osservato nel caso di dreno esteso fino al termine del

marginamento (si veda la Figura 12), si osserva un'inversione della direzione di flusso lungo la porzione più settentrionale dell'area (porzione inquadrata nelle carte di Figura 15). Anche se ridotto in lunghezza, un dreno più profondo provoca un aumento del richiamo di acqua da laguna, fenomeno che si traduce in una riduzione dell'efficacia ed efficienza di drenaggio dell'opera.

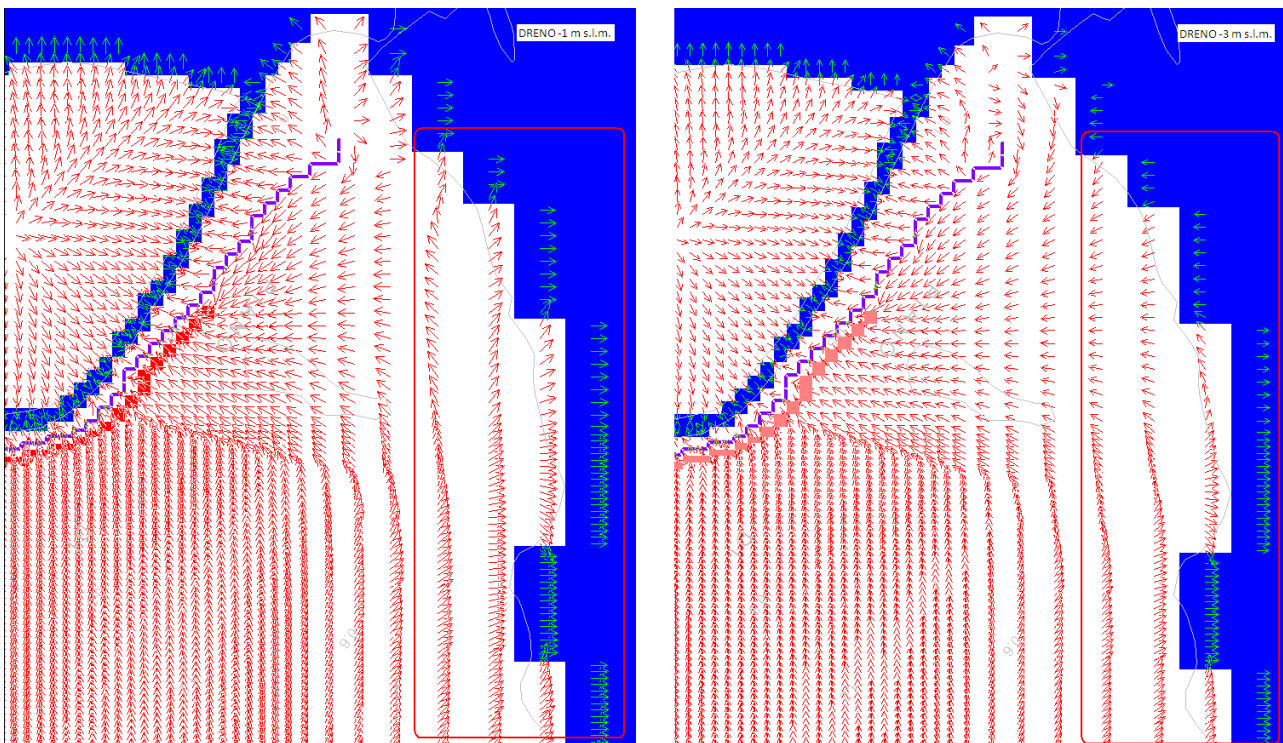


Figura 15 - Rappresentazione in pianta dei vettori di flusso per le simulazioni con dreno di estensione ridotta ed ubicato rispettivamente a -1 m s.l.m. (a sinistra) e a -3 m s.l.m. (a destra).

6 Conclusioni

Un modello matematico di flusso è stato utilizzato al fine di dimensionare la trincea drenante destinata a recuperare le acque di falda contaminate in un sito industriale dismesso.

In particolare sono state svolte alcune simulazioni finalizzate a definire profondità ed estensione della trincea in funzione dell'interazione con le acque della laguna, da cui l'opera è separata tramite un marginamento fisico. Poiché l'area è naturalmente soggetta ad allagamento, l'azione della trincea è stata valutata simulando un evento meteorico intenso e calcolando la variazione della superficie allagata in funzione delle caratteristiche dimensionali dell'opera.

Sono stati simulati tre scenari alternativi impostando la trincea alle quote di -1,5, -2 e -3 m s.l.m. Nelle porzioni in cui l'aquiclude è più superficiale, la quota del dreno è stata impostata a profondità minori in modo da interessare unicamente la porzione acquifera superiore. Per tutti i casi, è stata simulata la ricarica corrispondente ad un evento di precipitazione con tempo di ritorno di 25 anni.

L'approfondimento della quota di posa del dreno determina una progressiva, anche se limitata, riduzione dell'estensione delle aree allagate. Tale riduzione avviene principalmente in corrispondenza di un'area già naturalmente soggetta ad allagamento, spesso per lunghi periodi di tempo. L'approfondimento del dreno non produce, in tal senso, un miglioramento apprezzabile.

Valutando le direzioni di deflusso ed il bilancio di massa, si osserva invece come un dreno a quota inferiore rispetto a quella di progetto incrementi il richiamo di acqua dalla laguna e dalla porzione acquifera sottostante

rispetto a quella oggetto della bonifica. Ne consegue una riduzione di efficacia ed efficienza dell'opera ed un incremento degli oneri di smaltimento delle acque estratte.

È stato poi valutato l'effetto che la riduzione di 100 metri dell'estensione della trincea lungo il tratto terminale di nord-ovest comporta rispetto sia al richiamo di acqua dalla laguna, sia ai fenomeni di allagamento che si osservano nell'area di studio.

Dalle simulazioni eseguite emerge un incremento marginale della superficie soggetta, in caso di evento meteorico intenso, ad allagamento. Si tratta di un'area di estensione molto limitata e prospiciente la laguna. Anche in questo caso, si ritiene che il fenomeno sia del tutto marginale e tale da non bilanciare i vantaggi, in termini di incremento di efficacia ed efficienza, che il dreno subisce a seguito della riduzione nel richiamo di acqua da laguna. Infatti la riduzione della lunghezza dell'opera consentirebbe di ridurre sensibilmente il richiamo di acqua da laguna senza penalizzare l'azione drenante dell'acqua di falda contaminata.

I risultati delle simulazioni svolte consentono quindi di calcolare la quota ottimale di posa della trincea, corrispondente alla quota più superficiale di 1,5 m s.l.m. e di stabilire come non sia necessario che il marginamento sia affiancato, lungo tutta la lunghezza, dalla trincea. Anzi, è consigliabile che la trincea venga interrotta ad una distanza di almeno 100 metri rispetto al limite settentrionale del marginamento: la conseguente riduzione del richiamo di acqua dalla laguna aumenta l'efficienza dell'opera riducendo i costi di gestione senza diminuirne l'efficacia nel captare le acque di falda contaminate.

Lo studio svolto dimostra come il supporto modellistico consenta l'adozione di configurazioni di intervento non banali (quale la riduzione della lunghezza della trincea

rispetto al marginamento fisico adiacente) in grado di ottimizzare gli obiettivi di risanamento prefigurati consentendo, come

nel caso in esame, anche una riduzione dei costi di intervento e di gestione dell'opera.

Bibliografia

Doherty, J.E., and Hunt, R.J., 2010, Approaches to highly parameterized inversion—A guide to using PEST for groundwater-model calibration: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5169, 59 p.

Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C., and McDonald, M.G., 2000, MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model -- User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121 p.

Langevin, C.D., Thorne, D.T., Jr., Dausman, A.M., Sukop, M.C., and Guo, Weixing, 2008, SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi-Species Solute and Heat Transport: U.S. Geological Survey Techniques and Methods Book 6, Chapter A22, 39 p.

Thornthwaite C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review - 1 : Vol. 38.