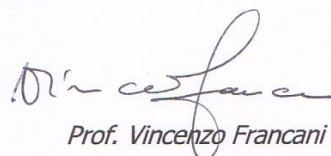


Syndial S.p.A.
Stabilimento di Brindisi

MODELLO MATEMATICO DI FLUSSO DELLE
AREE ESTERNE ALL'AREA DEL POLO
INDUSTRIALE DI BRINDISI



Prof. Vincenzo Francani



Dott. Luca Alberti

Ing. Matteo Antelmi

GIUGNO 2012

AMB-BR1/12/2

INDICE

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUZIONE..... | 3 |
| 2 | SINTESI DEL MODELLO CONCETTUALE DI CIRCOLAZIONE IDRICA SOTTERRANEA | 4 |
| 2.1 | SCHEMA DELLA STRUTTURA IDROGEOLOGICA..... | 4 |
| 2.2 | SCHEMA DELLA CIRCOLAZIONE IDRICA..... | 7 |
| 3 | COSTRUZIONE DEL MODELLO MATEMATICO DI FLUSSO..... | 12 |
| 3.1 | DOMINIO DI MODELLAZIONE E SUA DISCRETIZZAZIONE | 13 |
| 3.2 | CONDIZIONI AL CONTORNO..... | 16 |
| 3.2.1 | <i>Condizioni al contorno LUNGO IL LIMITE OVEST.....</i> | <i>16</i> |
| 3.2.2 | <i>Condizioni al contorno LUNGO IL LIMITE SUD.....</i> | <i>17</i> |
| 3.2.3 | <i>Condizione al contorno di NORD ED EST.....</i> | <i>19</i> |
| 3.2.4 | <i>Condizioni interne.....</i> | <i>20</i> |
| 3.2.5 | <i>RICARICA VERTICALE.....</i> | <i>24</i> |
| 3.3 | PROPRIETA' IDROGEOLOGICHE | 25 |
| 3.3.1 | <i>Permeabilità.....</i> | <i>25</i> |
| 3.3.2 | <i>POROSITÀ.....</i> | <i>28</i> |
| 4 | CALIBRAZIONE IN REGIME TRANSITORIO | 30 |
| 4.1 | PROCEDURA DI CALIBRAZIONE..... | 30 |
| | BIBLIOGRAFIA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO..... | 49 |
| | ALLEGATO A..... | 51 |
| | ALLEGATO B..... | 53 |
| | ALLEGATO C..... | 56 |

La presente relazione è stata redatta nell'ambito del Contratto di Ricerca ENI-Politecnico di Milano N° 2500006806

Vincenzo Francani, Docente

Luca Alberti, Ricercatore

Matteo Antelmi, Assegnista

1 INTRODUZIONE

Il presente documento ha lo scopo di descrivere in modo sintetico le principali caratteristiche del modello matematico del flusso idrico sotterraneo realizzato per le Aree Esterne allo stabilimento industriale di Brindisi (BR). Il dominio del modello è esteso ben oltre l'area di stretto interesse della presente modellazione, corrispondente all'Area H e alla zona nord delle Aree E e G. Tale scelta è stata compiuta per poter includere limiti fisici quali condizioni al contorno o, laddove questo non fosse possibile, allontanare a sufficienza le condizioni al contorno dedotte dalle misure piezometriche. Inoltre l'estensione del dominio ha permesso di raccordare il presente modello con modellazioni precedentemente condotte all'interno dello Stabilimento. È comunque bene evidenziare che il processo di calibrazione è stata condotta attenendosi ai dati ricadenti all'interno dell'area d'interesse.

Il modello è stato realizzato per le seguenti finalità:

- valutare l'entità complessiva dei deflussi idrici sotterranei per le Aree Esterne e gli apporti determinati dall'area Micorosa;
- valutare gli effetti indotti dalla barriera idraulica interna allo Stabilimento sulle direzioni di deflusso sotterraneo nelle Aree Esterne;
- costituire lo strumento a supporto per la valutazione e progettazione di eventuali opere d'intervento da realizzarsi nelle Aree Esterne.

La realizzazione del modello matematico è stata preceduta dalla formulazione del modello concettuale, per il quale ci si è avvalsi di tutte le informazioni dirette ed indirette raccolte sulle aree interne ed esterne al Polo Industriale, di cui si dà conto nel presente documento.

Data l'appartenenza di una parte dell'area di studio all'ambiente costiero, prossimo al mare, il modello è stato sviluppato tenendo conto degli effetti della presenza di acque dotate di maggior densità attraverso l'attribuzione di carichi equivalenti lungo costa. Durante la seconda fase di modellazione, già in atto, verrà prodotto un modello densità-dipendente in grado di simulare oltre la distribuzione dei carichi idraulici anche quella delle concentrazioni di sali nell'acquifero.

2 SINTESI DEL MODELLO CONCETTUALE DI CIRCOLAZIONE IDRICA SOTTERRANEA

Ai fini del presente lavoro la formulazione del modello concettuale consiste nella definizione dei meccanismi di deflusso delle acque di falda. Un'appropriatezza definizione del modello concettuale si deve avvalere di tutta la documentazione disponibile per l'area: ovvero tutti gli studi eseguiti in precedenza nel sito sotto esame e nell'area circostante, fino ad una distanza ritenuta congrua con la scala del problema, e tutti i dati reperiti mediante indagini dirette ed indirette ivi eseguite.

Si riporta di seguito una descrizione della struttura idrogeologica frutto di numerosi studi realizzati in precedenza da differenti soggetti, sintetizzando gli elementi di interesse al fine di comprender al meglio i meccanismi di circolazione idrica sotterranea

2.1 SCHEMA DELLA STRUTTURA IDROGEOLOGICA

L'area di studio è ubicata immediatamente ad Est della città di Brindisi ed affaccia sul mare Adriatico (Figura 1). L'area comprende l'intero Polo Industriale di Brindisi, le aree esterne allo stabilimento di proprietà Syndial, l'Oasi Protetta ed invasi d'acqua di piccole dimensioni ad uso antropico.

Le aree esterne di proprietà di Syndial sono state investigate mediante l'esecuzione di indagini dirette (sondaggi e piezometri) ed indirette (geoelettrica) (ERM, 2010). La Figura A 1 e la Figura A 2 in Allegato A riportano in planimetria tutte le indagini dirette e i punti utilizzati per 2 campagne piezometriche realizzate in due istanti temporali differenti, utilizzate ai fini del presente studio.

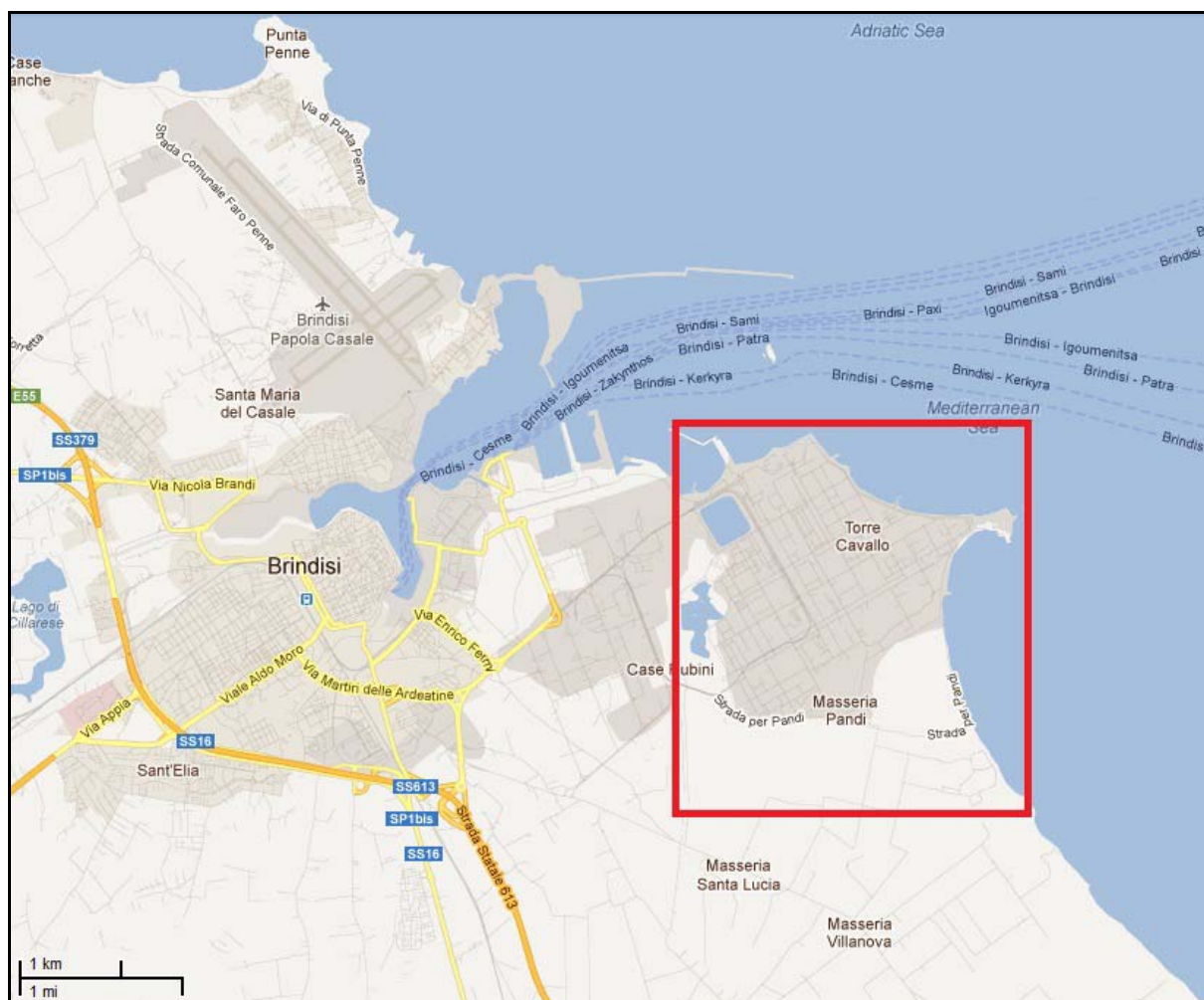


Figura 1 - Inquadramento dell'area di studio.

Secondo quanto riportato nel Piano di Caratterizzazione (Aquater 2004), l'attività di perforazione eseguita nelle aree Syndial interne allo Stabilimento ha permesso di ricostruire la successione litostratigrafica dei terreni fino a circa 35 m di profondità rispetto al piano campagna medio di Stabilimento. Le indagini condotte tra il 2009 ed il 2010 nelle aree esterne Syndial (ERM, 2010) confermano la successione stratigrafica descritta nel documento Aquater (2004). In base alle loro caratteristiche litostratigrafiche e di permeabilità, i terreni possono essere raggruppati, dall'alto verso il basso, in 5 gruppi principali:

- Terreni e materiali di riporto (A), a permeabilità variabile, hanno uno spessore per lo più compreso tra 0 e 2.5 m, con spessori massimi pari a 4.5 e 6 m. è costituito da elementi a varia granulometria (ciottoli, ghiaie, sabbie-limose, limi-sabbiosi a luoghi contenente pezzame lateritico e frammenti di calcestruzzo). I riporti non sono generalmente sede di falda acquifera.

- Depositi continentali (B), con permeabilità da bassa a medio bassa con classi granulometriche eterogenee costituite da: limi-sabbiosi-ghiaiosi, limi argillosi, argille limose, vari colori. In prossimità del livello di falda i depositi sono ricchi di concrezioni carbonatiche di varia granulometria (facies continentale). Hanno uno spessore medio variabile generalmente tra 0.5 e 5 m; la parte superiore è costituita da limi e limi sabbiosi, che si presentano asciutti e costituiscono un livello da mediamente a fortemente pedogenizzato. Al di sotto si estendono i limi argillosi-ghiaiosi ricchi di concrezioni carbonatiche, con continuità ed uguale potenza all'interno dello stabilimento; tali depositi sono stati rinvenuti in fase di perforazione sia al di sopra che al di sotto del livello di falda.
- Depositi marini terrazzati (C) con permeabilità medio-alta, eterogenei, costituiti da sabbia ghiaiosa limosa di colore giallo nocciola, sono presenti livelli discontinui calcarenitici cementati di colore biancastro (facies marina di spiaggia). Tale deposito costituisce la formazione nota in letteratura con il nome di "unità Panchina". Contengono intercalazioni di livelli calcarenitici alterati e fratturati e limi argillosi con all'interno ghiaia di genesi calcarenitica, di colore marrone-rossastro. Sono sede dell'acquifero superficiale ed hanno spessori medi dell'ordine dei 12-18 m, nella zona interna allo Stabilimento, e dei 7-8 m nelle aree esterne. Tale livello, confrontando le descrizioni litologiche rinvenute in letteratura, sembra riferibile dal punto di vista stratigrafico alla parte sommitale della formazione di Gallipoli.
- Depositi limosi basali (D), con permeabilità medio bassa, costituiti da limi-sabbiosi, limi-argillosi grigi a permeabilità medio bassa (facies marina di piattaforma continentale – zona distale). Di colore da grigio a grigio scuro, hanno una frazione argillosa che aumenta con la profondità di pari passo con la diminuzione della frazione sabbiosa. Gli spessori medi rinvenuti nell'area sono dell'ordine dei 12-15 m. Nella loro parte sommitale, dove la componente sabbiosa è maggiore, costituiscono la porzione basale dell'acquifero sebbene abbiano caratteristiche di permeabilità nettamente inferiori a quelle del livello sabbioso soprastante.
- Depositi argillosi basali (E), a permeabilità bassa, costituiti da argille grigio-azzurre poco plastiche (facies marina di piattaforma continentale – zona batiale). Si rinvencono alla base dei limi grigi di cui sopra, normalmente a profondità superiori ai 26 m.

A titolo esemplificativo si riporta una tipica successione stratigrafica rappresentata attraverso le sezioni geologiche elaborate a partire dalle stratigrafie ottenute dalle indagini effettuate. Le restanti sezioni relative protetta alle aree esterne allo stabilimento sono riportate in Allegato B. La Figura 2 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** mostra una sezione (la A-A') che attraversa le aree esterne con orientazione N-S; sono sovrainpresse le lettere rappresentative delle unità stratigrafiche identificate entro la profondità di interesse.

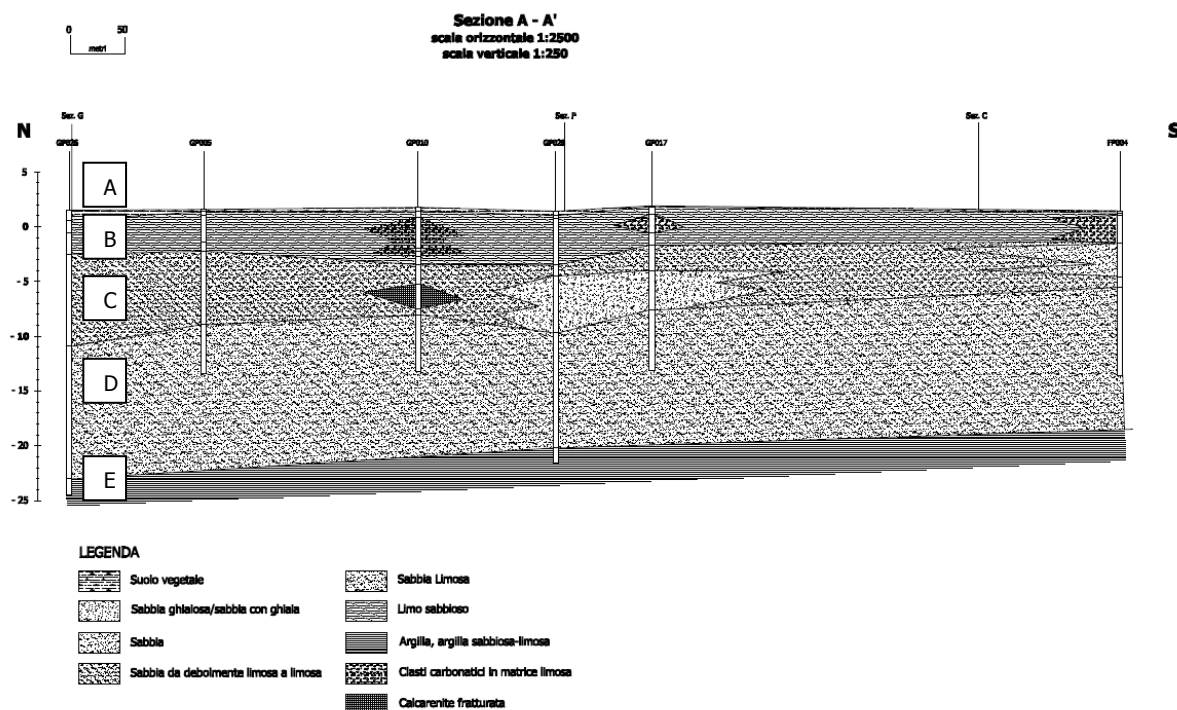


Figura 2 - Sezione geologica A-A' eseguita nelle aree esterne. Sono visibili le unità stratigrafiche rinvenute entro i primi 25 metri da p.c.

2.2 SCHEMA DELLA CIRCOLAZIONE IDRICA

Nell'area di studio sussistono dunque due sistemi idrogeologici distinti e separati:

- Il primo superficiale è caratterizzato da una falda freatica che è impostata nei depositi marini terrazzati pleistocenici e sostenuta dalle argille plio-pleistoceniche;
- Il secondo più profondo è rappresentato da un acquifero calcareo costituito dalle formazioni calcaree cretache e calcarenitiche mioceniche, protetto dalle argille plio-pleistoceniche.

In alcune zone dello stabilimento l'acquifero risulta essere delimitato verso l'alto da terreni a bassa permeabilità, che, quando presenti, conferiscono alla falda caratteristiche di semiconfinamento (Aquater, 2004).

L'acquifero profondo (non oggetto della presente modellazione) è costituito da rocce carbonatiche cretache fessurate e carsificate, sopra le quali poggiano sabbie e calcareniti; la falda profonda, confinata dai depositi argillosi, defluisce verso la costa con gradiente inferiore a 0.05% (ERM, 2010).

La falda superficiale, su cui si concentra esclusivamente l'interesse del presente lavoro, è di tipo freatico ed è presente là dove i depositi recenti, costituiti da sabbie permeabili per porosità, sono sostenuti dalle argille grigio-azzurre. Le 4 campagne piezometriche eseguite a luglio 2010, luglio e ottobre 2011 e gennaio 2012, che hanno interessato alcuni punti della rete piezometrica interna allo Stabilimento ed i punti della rete piezometrica esterna, hanno messo in evidenza la presenza di un deflusso principale orientato da Sud-Ovest verso Nord, Nord-Est con gradienti compresi tra il 2‰ e il 6.25‰ (Francani, 2012). A titolo esemplificativo si riportano due carte piezometriche utilizzate come riferimento nel modello numerico di flusso, relative alla campagna piezometrica del marzo 2010 e quella del luglio 2011 (Figura 3 e Figura 4). In Figura 5 vengono riportate le sole misure piezometriche i cui valori, in alcuni casi, si discostano di 1 cm rispetto ai valori presenti nell'interpolazione di Figura 4, a causa della diversa approssimazione decimale utilizzata nella produzione delle due figure.

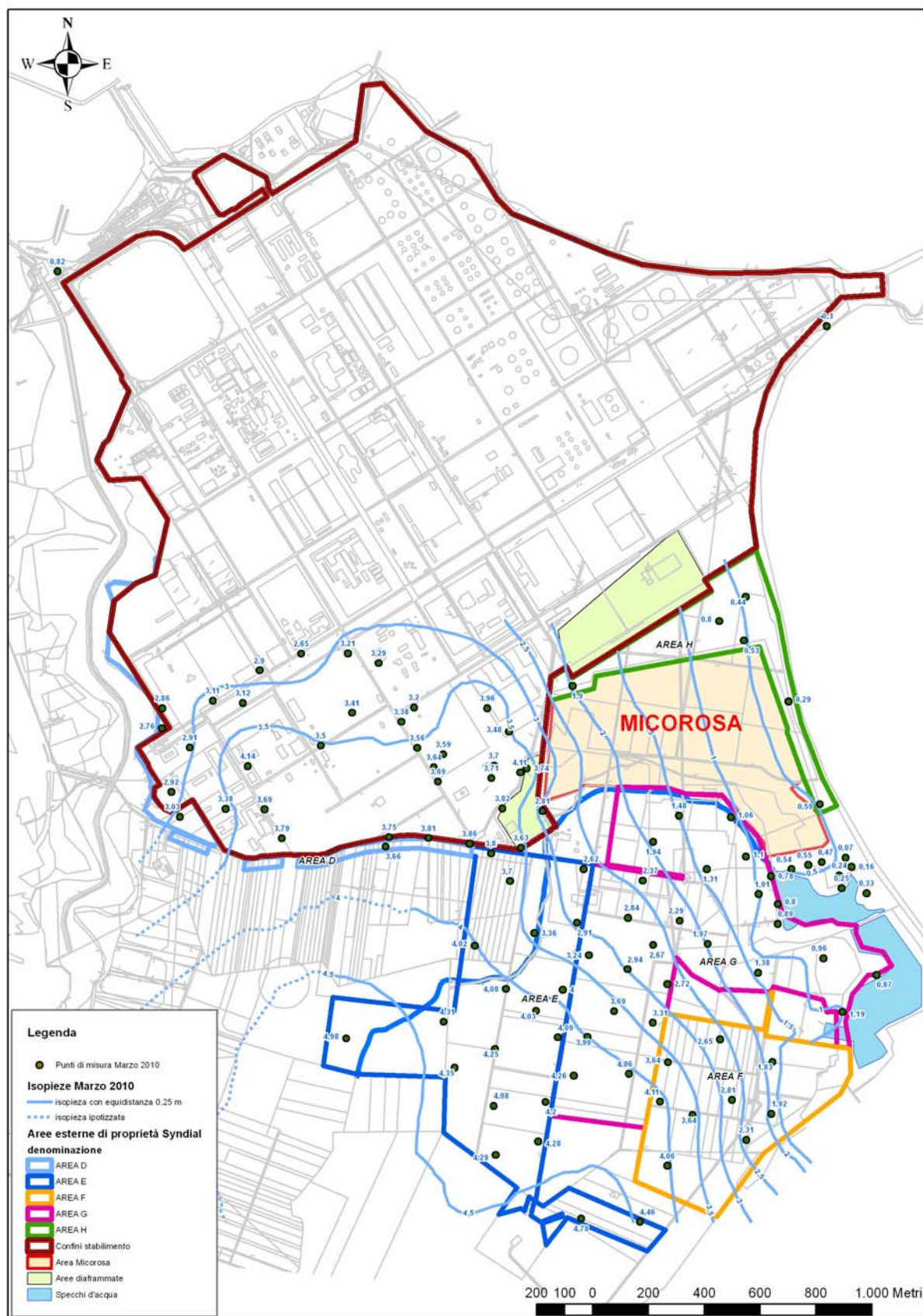


Figura 3 - Piezometria elaborata con i livelli misurati – 1 marzo 2010.

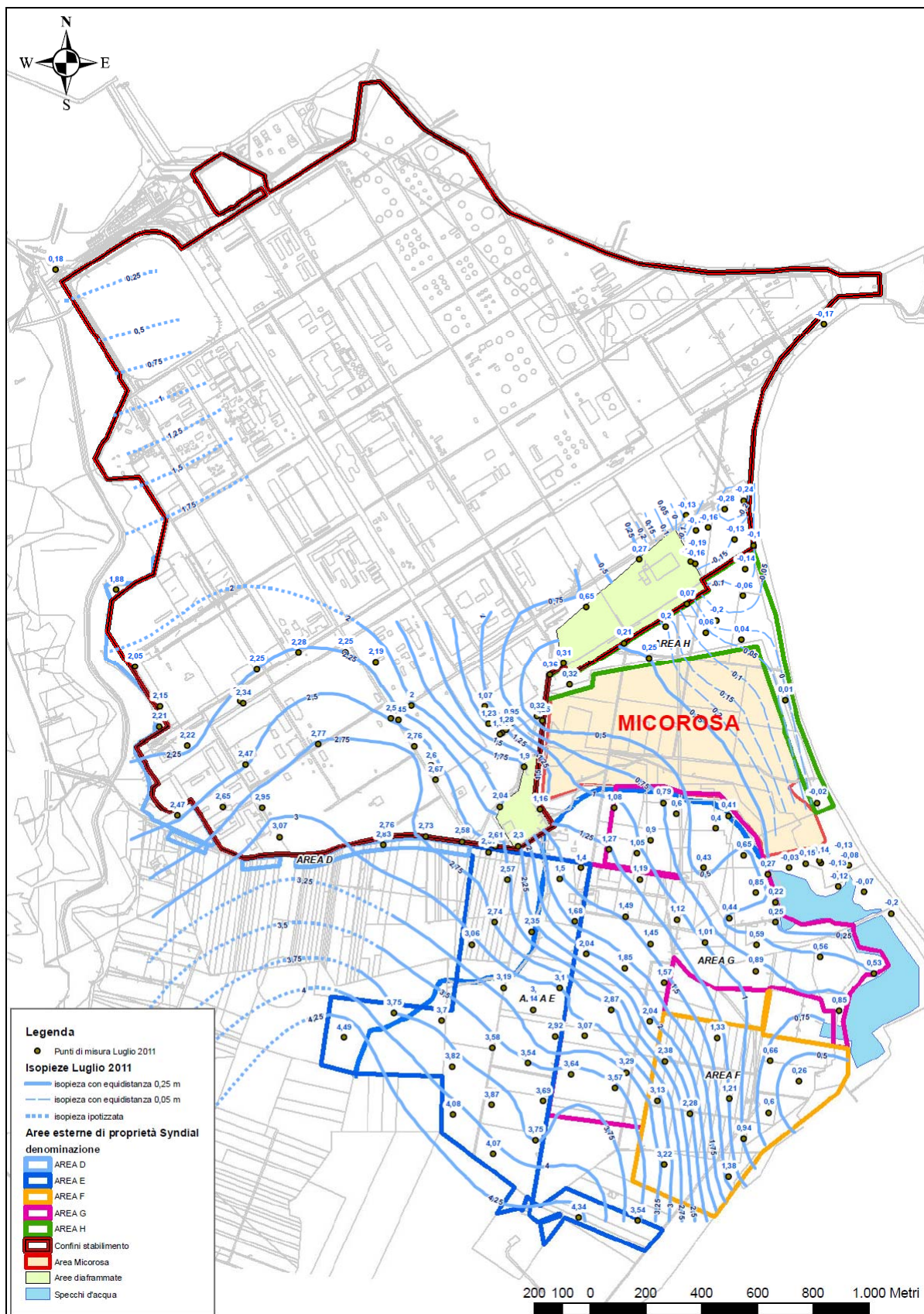


Figura 4 - Piezometria elaborata con i livelli misurati – luglio 2011.

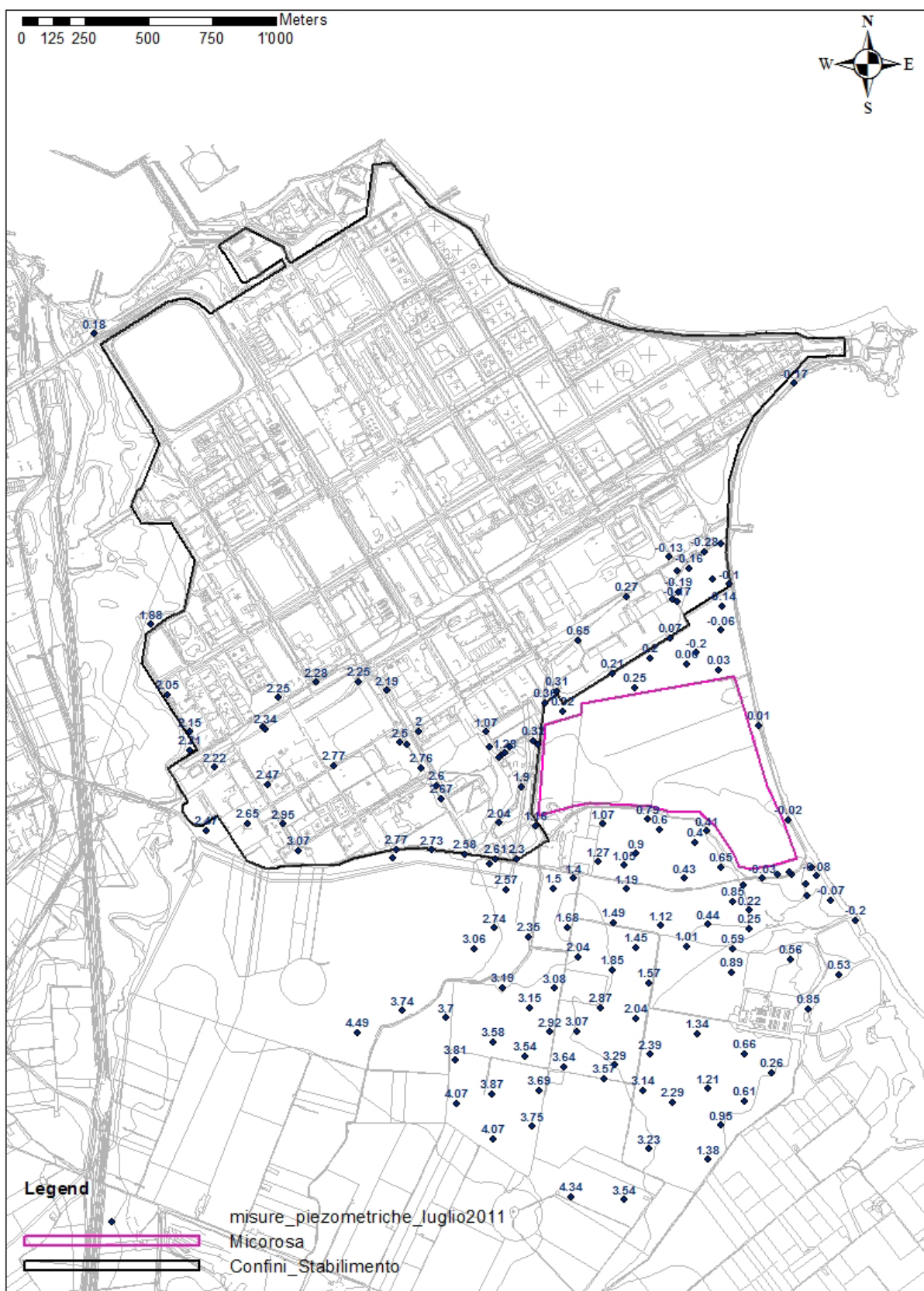


Figura 5 - Carichi idraulici misurati nei piezometri nell'acquifero superficiale nel luglio 2011.

*Modello matematico di flusso delle aree esterne all'area del polo industriale di Brindisi –
AMB-BR 1/12/2 -GIU. 2012*

3 COSTRUZIONE DEL MODELLO MATEMATICO DI FLUSSO

Il modello è stato realizzato FEFLOW (Finite Element subsurface FLOW system, version 5.3), codice di calcolo densità-dipendente agli elementi finiti, sviluppato da WASY LTD per la simulazione del flusso e del trasporto salino in mezzi porosi, in condizioni sature od insature. Il software risolve l'equazione di conservazione della massa e l'equazione di Darcy con densità del fluido variabile. La scelta è ricaduta su questo codice fondamentalmente per il fatto che l'approccio agli elementi finiti, a differenza del metodo alle differenze finite usato dai classici modelli numerici di flusso delle acque sotterranee, tra cui MODFLOW, avrebbe garantito una maggiore flessibilità nella discretizzazione spaziale del dominio, permettendo una migliore rappresentazione degli elementi naturali (specchi d'acqua e torrenti) e della posizione dei pozzi della barriera idraulica interna allo Stabilimento.

La vicinanza della zona indagata con il mare al confine Nord ed Est ha reso necessario impostare un modello di flusso che tenga conto dell'influenza che la concentrazione salina ha sulla densità e, quindi, sulla distribuzione dei carichi idraulici e le direzioni di deflusso sotterraneo. L'acqua salata, più densa (l'acqua di mare assume una densità pari a circa 1,028 g/cm³) dell'acqua dolce (1,0 g/cm³), esercita, a parità di spessore di colonna d'acqua, una pressione superiore. Per questa ragione nella fase iniziale è stata adottato un modello di flusso che rappresentasse la presenza del mare mediante carichi idraulici equivalenti (Molz L. and Sedighi A., 2009). L'aumento di pressione dovuto all'acqua salata è stato tradotto come aumento di carico idraulico mediante l'equazione:

Equazione 1

$$h' = \frac{\rho_s}{\rho_d} h_s - \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d} z'$$

con:

h' = carico idraulico equivalente;

h_s = carico idraulico dell'acqua salata;

ρ_d = densità dell'acqua dolce;

ρ_s = densità dell'acqua salata

z' = quota media s.l.m. delle celle del layer.

Questo ha permesso di ottenere in una prima fase un modello di flusso calibrato sulla base dei carichi idraulici misurati in campo lasciando ad una seconda fase la taratura delle concentrazioni di sali rilevate.

3.1 DOMINIO DI MODELLAZIONE E SUA DISCRETIZZAZIONE

La scelta di utilizzare un codice di calcolo agli elementi finiti permette di definire una griglia che si adatti al meglio all'area indagata, indipendentemente dalla direzione principale di deflusso (elemento importante da considerare nei codici alle differenze finite) e costituita da elementi di diverse dimensioni, in funzione della zona indagata. Il dominio di modellazione è stato ampiamente esteso oltre la zona di stretto interesse che è costituita principalmente dalla parte settentrionale delle Aree Esterne ed in particolare dai settori H, E e G. Tale scelta è stata compiuta per poter includere limiti fisici quali condizioni al contorno o, laddove questo non fosse possibile, allontanare a sufficienza le condizioni al contorno dedotte dalle misure piezometriche.

La griglia di discretizzazione è costituita da 44730 nodi e 72760 elementi prismatici triangolari (6 nodi). Nella zona costiera, dove per una corretta simulazione degli scambi idrici con il mare è necessaria una maglia più fine, alle celle è stata attribuita una dimensione variabile da 15 a 30 metri (Figura 6); nella fascia centrale del dominio, che rappresenta l'area di maggiore interesse ed occupa la parte meridionale dello stabilimento industriale e quella settentrionale delle aree esterne, si hanno dimensioni variabili delle celle da 30 a 50 metri; in tutto resto del dominio si sono costruite celle di dimensioni tra i 50 e 100 metri.

Una volta assegnato il numero di celle è stato eseguito il controllo e la successiva correzione dei triangoli ottusi (elementi triangolari con angoli superiori a 90° e 120°) e degli elementi che non rispettavano il criterio di Delaunay.

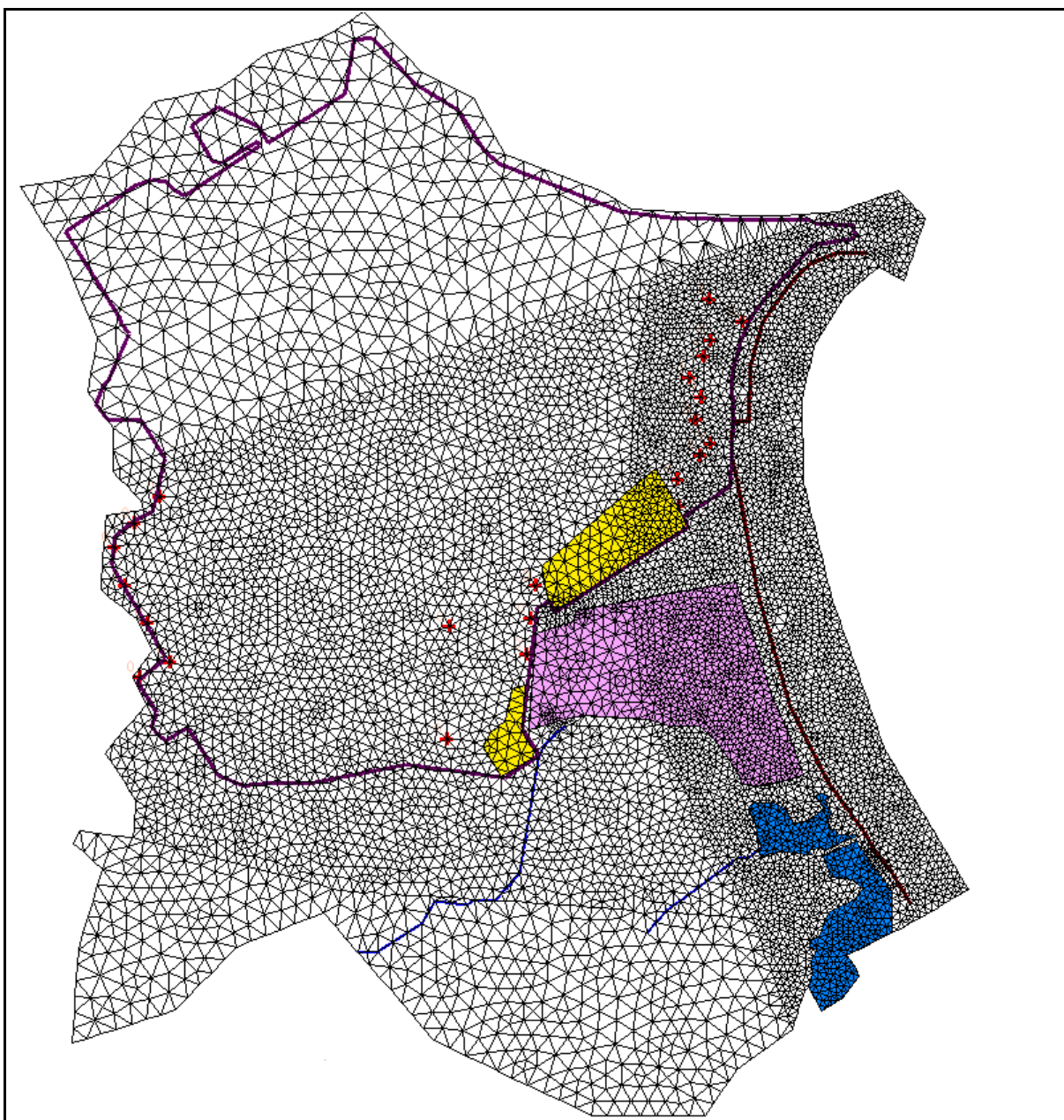


Figura 6 - Dominio e discretizzazione del modello di flusso nel piano orizzontale.

Lungo la direzione verticale è stata interessata una profondità variabile da circa 10 metri (nella zona Ovest) fino a circa -30 metri sul livello del mare nella zona Est dello stabilimento ed a Sud del dominio. 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 cinque layers (sei slices), suddivisi in questo modo (Figura 7):

- layer 1, 2: primo livello superficiale (B), costituito da terreno vegetale seguito da materiale eterogeneo costituito prevalentemente da limi argillosi e sabbie limose di colore brunastro;
- layer 3, 4: sabbia color ocra (C); livello costituito da alternanze irregolari di sabbie sciolte e di livelli calcarenitici: le sabbie sono costituite prevalentemente da granuli quarzosi e calcari di colore generalmente giallognolo con tonalità più chiare o più scure a seconda dello stato di alterazione; la grana è variabile infatti si passa da sabbie vere e proprie a sabbie fini più o meno limose;
- layer 5: limo sabbiosi grigio azzurri (D), sabbia debolmente limosa grigiastria molto poco consistente e satura; sul fondo dell'unità tende ad aumentare la percentuale di limo ed argilla a discapito della quantità di sabbia presente.

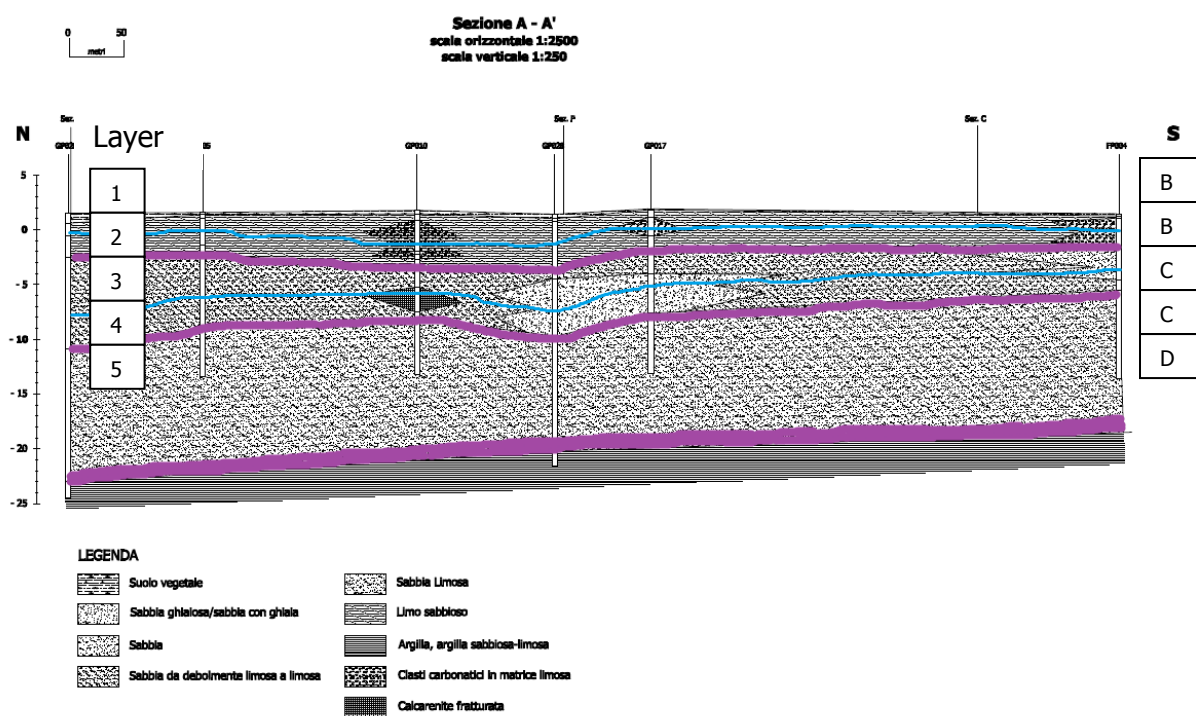


Figura 7 - Discretizzazione verticale del dominio lungo la sezione A-A'. Le linee viola separano le unità stratigrafiche, le linee blu sono le suddivisioni, interne alle unità, operate per aumentare la discretizzazione verticale. La linea viola più spessa rappresenta la base del modello.

La suddivisione in cinque layers è stata necessaria al fine di garantire spessori limitati in ogni layer affinché nella seconda fase di modellazione la griglia possa essere utilizzata per simulazioni densità-dipendenti.

La ricostruzione delle superfici dei layers è stata effettuata a partire dai dati delle stratigrafie della zona, effettuate dalla società Tecno In®, interpolando le diverse quote degli strati per ciascun punto con il metodo del *kriging*.

Per la ricostruzione del profilo topografico si sono utilizzate le quote di piano campagna dei vari sondaggi presenti nel dominio del modello, integrati con una serie di punti quotati presenti su carte catastali della zona e di punti osservati dal DEM (Digital Elevation Model). Anche in questo caso si è provveduto ad interpolare le diverse quote con la tecnica del *kriging*.

Dagli studi disponibili si desume che all'interno dell'acquifero sabbioso non vi sia presenza di livelli di materiali fini continui fino alla massima profondità d'indagine (circa 30 metri da p.c.) dove vengono mediamente rilevate le argille grigio-azzurre. La base del modello è stata quindi posizionata ad una profondità variabile dal piano campagna, coincidente con il limite tra limi sabbiosi grigio azzurri ed argille grigio azzurre. 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.

3.2 CONDIZIONI AL CONTORNO

3.2.1 CONDIZIONI AL CONTORNO LUNGO IL LIMITE OVEST

Lungo il lato W del modello è presente il C.le Grande, elemento drenante che è stato adottato quale limite fisico del modello così come era stato scelto nell'ambito della modellazione compiuta da Environ per le aree interne allo Stabilimento. Il canale è stato rappresentato mediante una condizione a carico costante, adottando un valore di 1.8 m s.l.m.m. per il tratto bacinizzato. Tale valore è stato dedotto dalla misura piezometrica rilevata a luglio 2011 nel piezometro DP001 posto a pochi metri dalla sponda. Non essendo disponibili punti di misura dei livelli idrici superficiali nel tratto di valle sino alla linea di costa, si sono adottati valori decrescenti dal livello del bacino a quello del mare ricostruiti mediante interpolazione lineare; per il tratto di monte si sono invece adottati valori crescenti aventi il medesimo gradiente idraulico mostrato dalle piezometrie nelle aree circostanti.

3.2.2 CONDIZIONI AL CONTORNO LUNGO IL LIMITE SUD

Lungo il limite S si è imposto un valore di carico costante (condizione di Dirichelet) su tutti i layers del modello (Figura 8Figura 7Figura 8). Tale valore è stato ricostruito attraverso l'analisi di diverse piezometrie condotte sulle Aree Esterne ed adottando quali valori per la calibrazione quelli della campagna piezometrica del luglio 2011. L'adozione di carichi idraulici costanti è stata ritenuta accettabile in quanto il limite si trova a distanza sufficiente dall'area di maggiore interesse.

Le condizioni al contorno imposte lungo il limite S rappresentano perlopiù un limite alimentante, assumendo, così come mostrato dalle piezometrie rilevate (Figura 4), un ruolo drenante solo nel tratto compreso tra i piezometri FP011 e FP004.

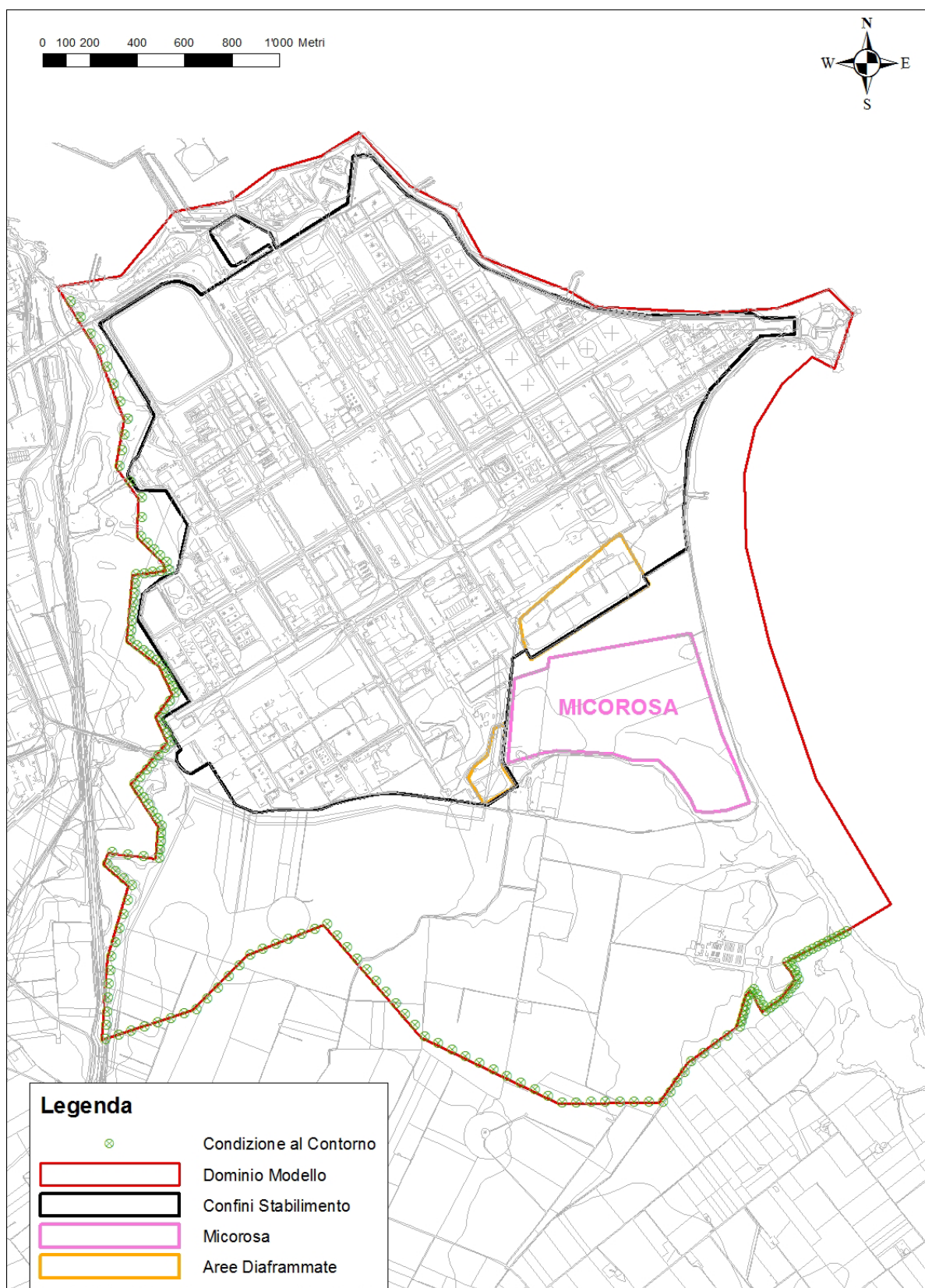


Figura 8 - Condizioni al contorno in corrispondenza del layer 1. La posizione delle condizioni di monte è mantenuta in tutti i layer del modello.

3.2.3 CONDIZIONE AL CONTORNO DI NORD ED EST

Le condizioni al contorno di valle sono rappresentate pressoché ovunque dalla linea di costa che si estende a partire dal lato N dello Stabilimento per poi proseguire lungo tutto il limite orientale del dominio di modellazione. Trattandosi di un limite avente carico medio costante, è stato rappresentato applicando una condizione di carico idraulico costante (condizione di *Dirichelet*). Nella fase di impostazione del modello il mare è stato considerato ad un livello pari a 0 m s.l.m.m., ma come successivamente esposto (par. 3.2.4) durante la fase di calibrazione tale valore è stato leggermente modificato in considerazione delle variazioni mareali.

Lungo il limite E, in considerazione del fatto che nell'area in esame il fondale marino si approfondisce con un gradiente molto ridotto (0.6%), è stato assegnato un carico inizialmente pari a 0 m s.l.m.m. ai soli nodi della prima slice lungo una fascia avente estensione di 250m dalla linea di costa (Figura 9a). Oltre tale distanza la condizione a carico costante è stata assegnata anche ai nodi delle slices sottostanti assegnando condizioni di carico equivalente per simulare la pressione superiore esercitata, a parità di colonna d'acqua, dall'acqua di mare rispetto all'acqua dolce fino ad una profondità massima di 30 m. Il carico idraulico equivalente, in funzione della profondità del fondo del mare, è stato ottenuto mediante la seguente relazione:

Equazione 2

$$h_s = h_d + \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d} \cdot z$$

con:

h = carico idraulico (dell'acqua dolce o salata) in m;

z' = quota media in m s.l.m. degli elementi del layer;

γ = peso specifico (dell'acqua dolce o salata) in kg/m³;

Diversamente lungo il limite N e N-E, trattandosi della parte del dominio maggiormente distante dall'area d'interesse oggetto della modellazione, la condizione al contorno è stata semplificata assegnando solo lungo la linea di costa un carico costante di 0 m s.l.m.m. alla prima slice e carichi equivalenti ai nodi delle slices immediatamente sottostanti.

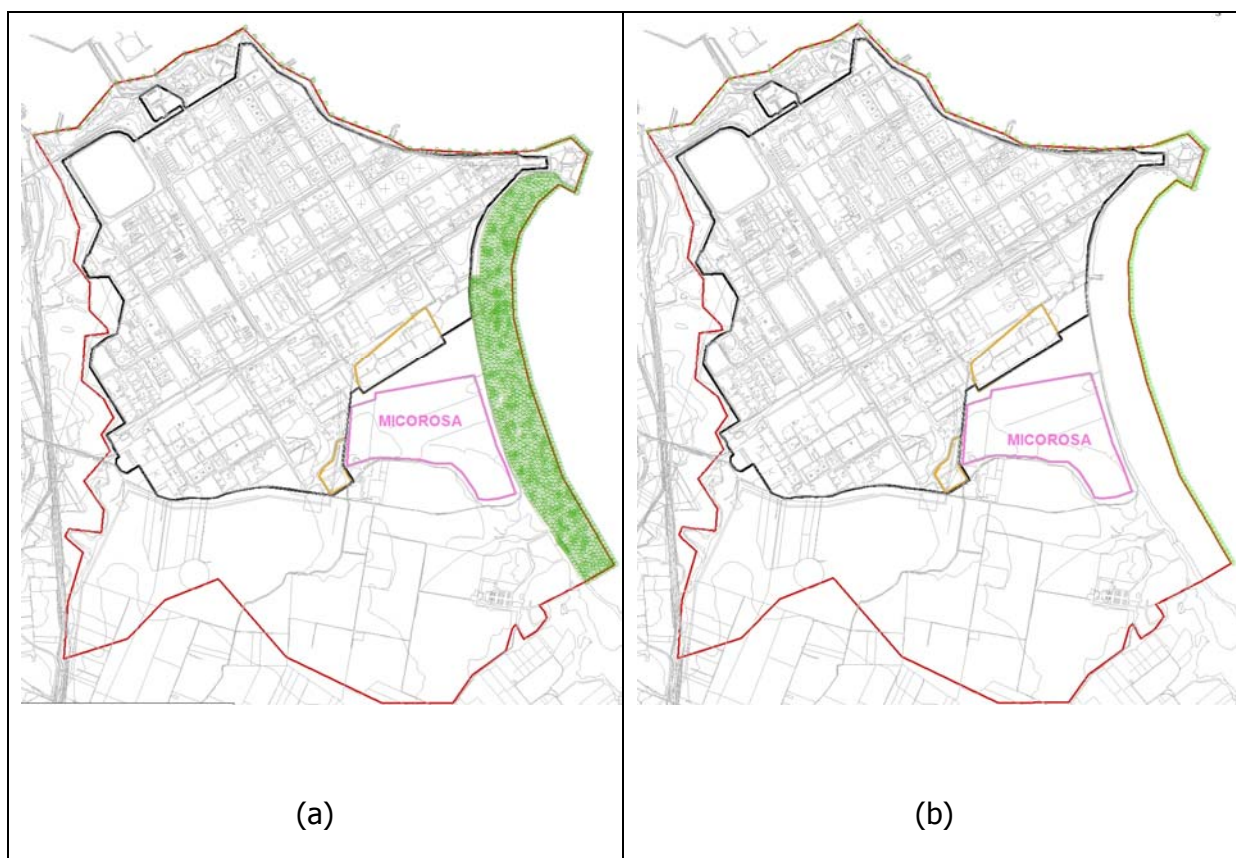


Figura 9 - Condizioni al contorno in corrispondenza del layer 1 (a) e del layer 2 (b).

3.2.4 CONDIZIONI INTERNE

All'interno del dominio modellato sono presenti il C.le Pandi e alcuni specchi d'acqua. Il canale Pandi, pur essendo molto superficiale riveste una certa importanza (Francani, 2011) poiché scorre lungo gli argini della discarica Micorosa, area fortemente contaminata. Si è deciso quindi di rappresentarlo con una condizione di flusso dipendente dal carico (condizione di *Cauchy*); a tale proprietà, in Feflow, è necessario associare il *Transfer Rate*, ovvero un valore di conduttanza funzione della permeabilità e dello spessore dei sedimenti di cui è caratterizzato il canale.

Il Pandi termina il proprio corso all'interno dell'Oasi Protetta, che risulta essere un vero e proprio piccolo e poco profondo lago molto vicino alla costa e che, proprio a causa di tale vicinanza, varia la propria altezza idrica in funzione dell'escursione della marea. Anche tale corpo idrico si è deciso di modellarlo con una condizione di *Cauchy*, alla quale è stato necessario assegnare a sua volta un nuovo valore di *Transfer Rate*. A causa della scarsità di dati disponibili in tali aree entrambe le condizioni al contorno impostate nel modello sono state sottoposte ad analisi di calibrazione.

Altri corpi idrici rappresentati nel modello sono stati i laghi artificiali localizzati a Sud, Sud-Est delle aree esterne allo Stabilimento: essi sono utilizzati per la pesca e vengono generalmente mantenuti ad un livello idraulico costante, di conseguenza la loro rappresentazione all'interno del modello è avvenuta mediante l'inserimento di condizioni di carico costanti (condizioni di *Dirichlet*).

Altre condizioni interne implementate nel modello sono quelle relative ai pozzi barriera, ai quali si è assegnata una condizione di flusso costante (condizione di Neumann), la quale prevede l'assegnazione del valore di portata emunta dai pozzi barriera. Non sono stati inseriti tutti i pozzi della barriera idraulica presenti all'interno dello stabilimento, ma, come si vede in Figura 10 solamente quelli che potevano influenzare i carichi simulati dei piezometri indagati nelle aree esterne allo stabilimento. Nello specifico si è assegnata la media mensile di portata emunta del medesimo periodo della campagna piezometrica simulata: il totale emunto risulta variare tra 1358 e 1600 m³/d.

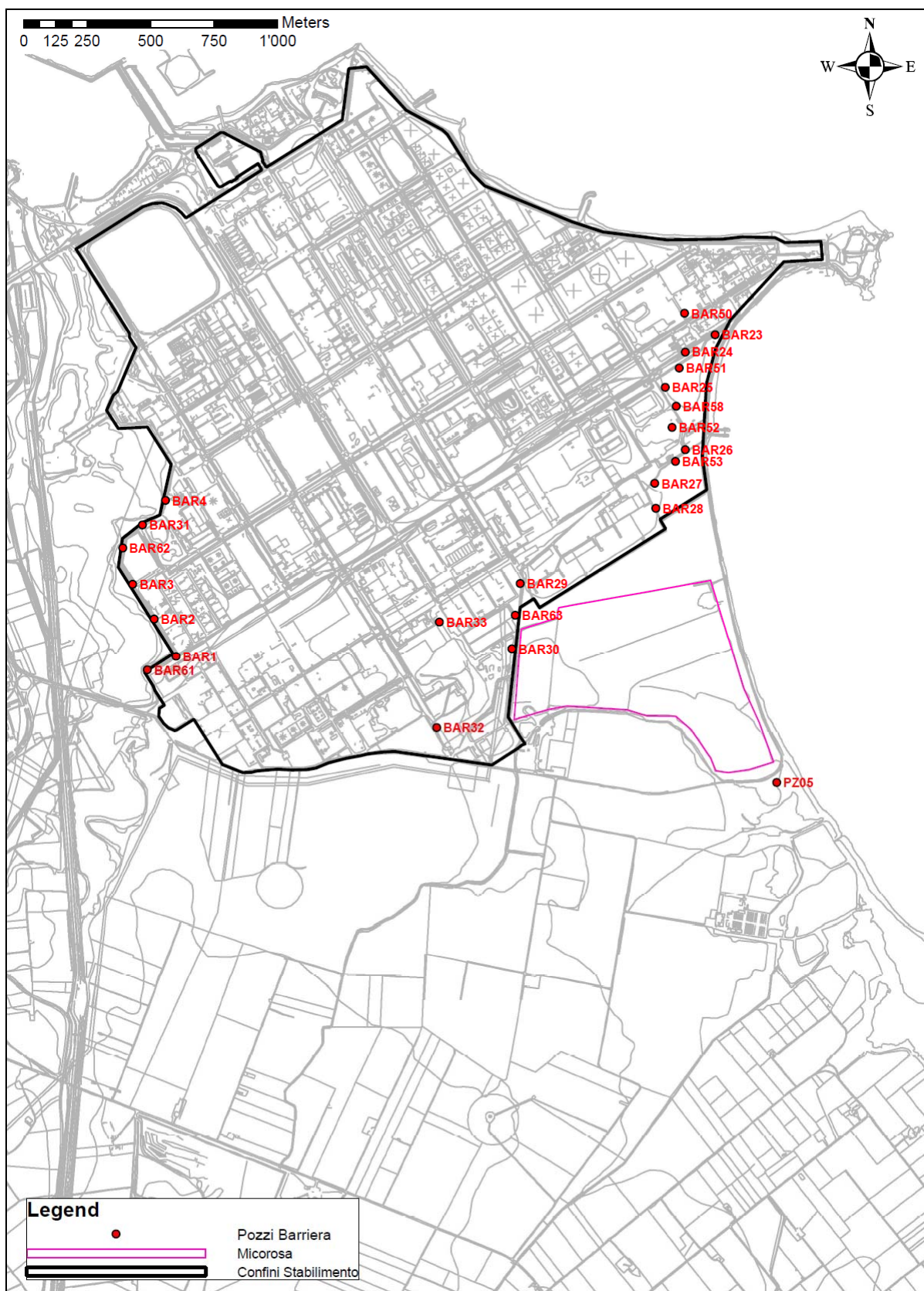


Figura 10 - Pozzi barriera utilizzati all'interno del modello

Si osservi in Figura 11 la distinzione tra le condizioni a carico costante (in blu), a flusso dipendente dal carico (in nero) e le condizioni a flusso costante (in rosso).

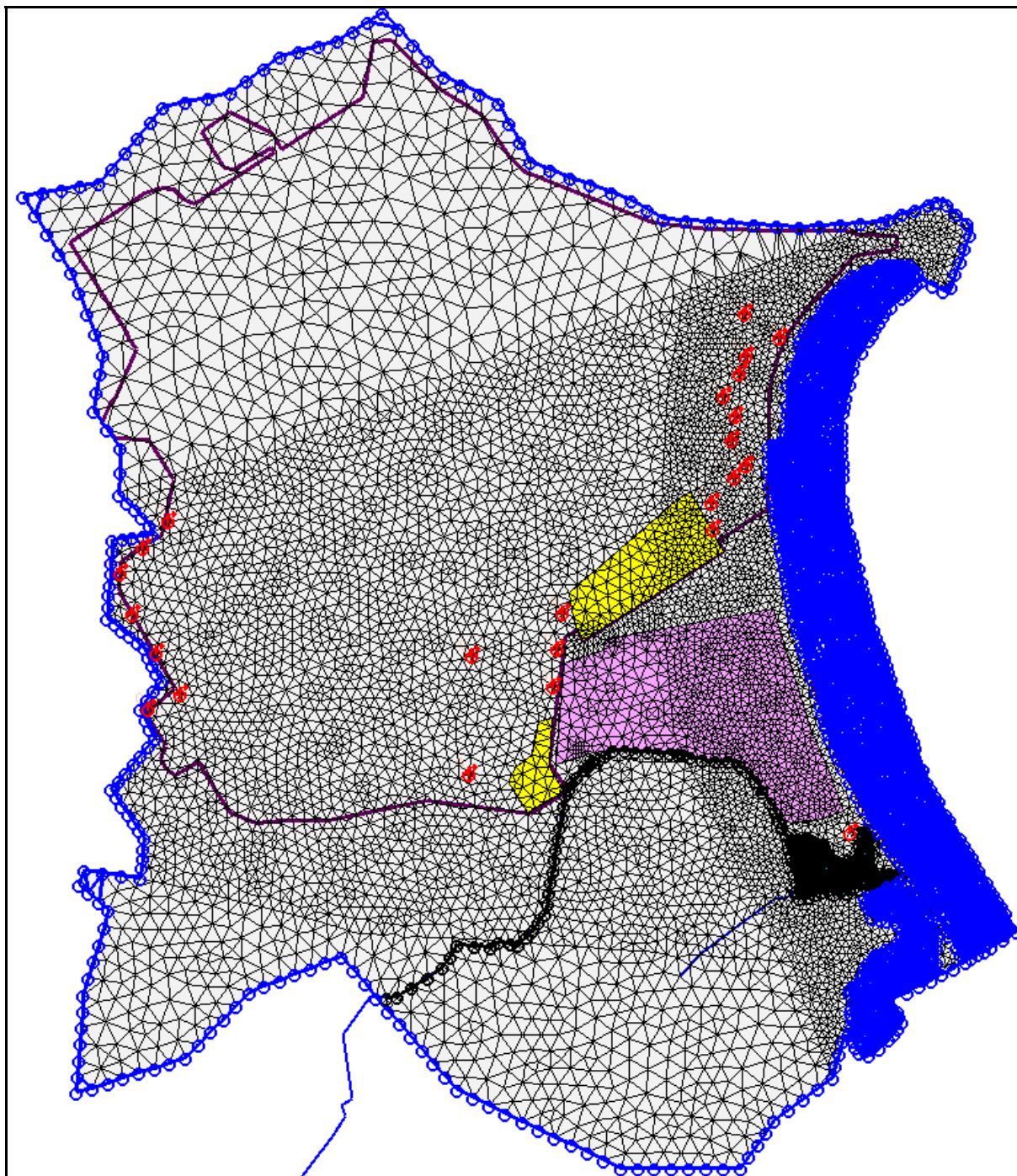


Figura 11 - Condizioni al contorno ed interne al modello in corrispondenza del layer 1 in Feflow.

3.2.5 RICARICA VERTICALE

La ricarica verticale (espressa in m/d) inserita nel modello rappresenta il quantitativo di acqua che si infila nel sottosuolo per azione delle piogge, depurata della percentuale di acqua soggetta ad evapotraspirazione e ruscellamento.

L'evapotraspirazione è una combinazione dei processi di evaporazione e di traspirazione, tramite i quali l'acqua viene trasferita all'atmosfera rispettivamente dalle superfici della terra (suolo e specchi liquidi) o attraverso la vegetazione. Data la difficoltà di valutare separatamente le singole componenti, evaporazione e traspirazione vengono usualmente valutate insieme.

Nel caso in esame il calcolo dell'infiltrazione nel terreno è stato effettuato a partire dal metodo di Thornthwaite. Questo metodo permette di valutare l'evapotraspirazione reale e il surplus idrico che rappresenta il quantitativo d'acqua disponibile sul terreno per l'infiltrazione e il ruscellamento. Questo modello ha consentito di stimare l'evapotraspirazione reale su base mensile.

L'intervallo temporale considerato per il calcolo della ricarica meteorica corrisponde all'anno 2010 e 2011. Per tale periodo, sono state raccolte le misure di temperatura e precipitazione media mensile rilevata nella stazione meteorologica dell'ARPA Puglia, ubicata a Brindisi. La Tabella 1 e la Tabella 2 riportano i dati utilizzati.

Tabella 1 – Precipitazioni, Infiltrazione (valori espressi in mm) e temperature medie mensili (valori espressi in °C) relative all'anno 2010 nella stazione di Brindisi.

| 2010 | <i>gen</i> | <i>feb</i> | <i>mar</i> | <i>apr</i> | <i>mag</i> | <i>giu</i> | <i>lug</i> | <i>ago</i> | <i>set</i> | <i>ott</i> | <i>nov</i> | <i>dic</i> |
|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <i>T [°C]</i> | 9.6 | 10.3 | 11.6 | 15.2 | 18.8 | 23.0 | 25.5 | 25.6 | 21.6 | 17.3 | 15.4 | 10.7 |
| <i>P [mm]</i> | 60.8 | 91.0 | 62.4 | 42.6 | 89.0 | 3.8 | 23.2 | 28.8 | 87.4 | 184.2 | 87.8 | 21.0 |
| <i>I [mm]</i> | 21,06 | 35,07 | 15,19 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 12,73 | 22,57 | 0,00 |

I dati relativi al 2010 sono stati utilizzati per calibrare un modello in stazionario utilizzato per riprodurre una distribuzione dei carichi piezometrici da utilizzarsi quale condizione iniziale per la simulazione in transitorio riguardante il periodo marzo 2010-luglio 2011.

Mentre nelle Aree Esterne si è ricorsi ai dati pluviometrici ed alla loro elaborazione mediante Thornthwaite, per l'area occupata dallo Stabilimento si sono utilizzati valori precedentemente adottati nei modelli precedentemente realizzati per l'area di Stabilimento.

Per modello stazionario relativo al marzo 2010 nelle Aree Esterne è stato utilizzato un valore di 106 mm/anno, corrispondente al 50% del surplus idrico calcolato con Thornthwaite per i 4 mesi antecedenti Marzo 2010.

Successivamente ai fini della simulazione in regime transitorio si sono adottati i valori mensili di infiltrazione calcolati mediante Thornthwaite (Tabella 2). Data le ridotte precipitazioni verificatesi dopo Marzo 2010 in molti mesi l'infiltrazione è risultata nulla. Per questa ragione per le aree interne allo Stabilimento, inizialmente è stato utilizzato lo stesso valore di ricarica fornito dal modello di flusso di Environ come per le simulazioni in regime permanente, ma successivamente in fase di calibrazione è stato diminuito (del 29%) per poter comunque tenere in considerazione della minore piovosità registrata anche nell'area industriale.

Tabella 2 – Precipitazioni, Infiltrazione (valori espressi in mm) e temperature medie mensili (valori espressi in °C) relative all'anno 2011 nella stazione di Brindisi.

| 2011 | <i>gen</i> | <i>feb</i> | <i>mar</i> | <i>apr</i> | <i>mag</i> | <i>giu</i> | <i>lug</i> | <i>ago</i> | <i>set</i> | <i>ott</i> | <i>nov</i> | <i>dic</i> |
|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <i>T [°C]</i> | 9.9 | 10.6 | 12.3 | 16.1 | 19.3 | 24.4 | 26.6 | 27.1 | 25.4 | 18.5 | 14.4 | 11.8 |
| <i>P [mm]</i> | 48.8 | 39.0 | 107.0 | 32.6 | 31.2 | 1.0 | 13.6 | 0 | 43.8 | 11 | 47.8 | 11.4 |
| <i>I [mm]</i> | 16,73 | 10,72 | 38,23 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

3.3 PROPRIETA' IDROGEOLOGICHE

3.3.1 PERMEABILITA'

La ricostruzione della distribuzione dei valori di permeabilità è stata effettuata a partire dai risultati dei test idraulici condotti negli anni in diverse zone del dominio di modellazione e per diverse litologie presenti nel sottosuolo. Complessivamente sono disponibili 24 valori di permeabilità ricavati da prove di pompaggio, 21 da slug test.

In Tabella 3 sono elencati i dati di permeabilità disponibili ed utilizzati per il modello, classificati in funzione del tipo di prova. Dall'interpolazione di questi valori mediante lo strumento *kriging* in Feflow è stato possibile ottenere una distribuzione di permeabilità

eterogenea su tutta la superficie del dominio (Figura 12). Considerando la profondità e la lunghezza di fenestrazione dei piezometri sottoposti alle prove, si sono considerati i valori di permeabilità ottenuti come quelli caratteristici delle sabbie color ocra, rappresentate nel III e IV layer.

Agli strati più superficiali (I e II layer), seguendo la struttura descritta nel modello concettuale, si è assegnata una permeabilità uniforme dell'ordine di 10^{-6} m/s, caratteristica dei limi sabbiosi o argillosi presenti. Là dove tale formazione era assente (ad esempio nella zona dell'Oasi Protetta) è stata data la stessa permeabilità delle sabbie color ocra dei layers sottostanti.

Per quanto riguarda il V layer formato dalle sabbie di color grigio-azzurro, non avendo informazioni maggiori sui valori di permeabilità se non quelli deducibili dalle stratigrafie, si è deciso di utilizzare la stessa distribuzione eterogenea del layer sovrastante (layer IV), ma riducendo tutti i valori di un ordine di grandezza al fine di rappresentare la maggiore frazione fine presente.

Tabella 3 - Valori di permeabilità ricavati dai est idraulici condotti in situ (permeabilità in m/s).

| ID Piezometro | Tipo di Prova | K [m/s] |
|----------------------|----------------------|----------------|
| BP001 | Slug Test | 5.00E-05 |
| DP001 | Slug Test | 6.80E-05 |
| EP004 | Slug Test | 5.20E-05 |
| EP011 | Slug Test | 4.30E-05 |
| FP011 | Slug Test | 8.10E-05 |
| GP001 | Prova di pompaggio | 8.90E-05 |
| GP008 | Prova di pompaggio | 2.76E-04 |
| GP017 | Slug Test | 5.30E-05 |
| GP019 | Prova di pompaggio | 1.36E-04 |
| HP003 | Slug Test | 4.80E-05 |
| IP001 | Slug Test | 1.10E-05 |
| OP001 | Prova di pompaggio | 1.04E-04 |
| PZ2B | Prova di pompaggio | 2.00E-05 |
| PZ3B | Prova di pompaggio | 3.88E-04 |
| PZ4B | Prova di pompaggio | 3.63E-04 |
| PZ4C | Prova di pompaggio | 1.39E-04 |
| PZ4D | Prova di pompaggio | 4.17E-04 |

| | | |
|---------|--------------------|----------|
| PZ4E | Prova di pompaggio | 5.20E-05 |
| PZ4F | Prova di pompaggio | 2.10E-05 |
| PZ5B | Prova di pompaggio | 9.20E-05 |
| PZ5D | Prova di pompaggio | 2.53E-04 |
| PZ6A | Prova di pompaggio | 1.70E-05 |
| PZ6B | Prova di pompaggio | 1.40E-04 |
| PZ6C | Prova di pompaggio | 2.80E-05 |
| PZ6F | Prova di pompaggio | 3.30E-05 |
| PZ8F | Prova di pompaggio | 1.50E-05 |
| PZA0016 | Slug Test | 1.20E-05 |
| PZA0046 | Slug Test | 1.30E-05 |
| PZA0054 | Slug Test | 1.60E-05 |
| PZA0075 | Prova di pompaggio | 6.60E-05 |
| PZA0102 | Slug Test | 4.30E-05 |
| PZB0016 | Prova di pompaggio | 1.28E-04 |
| PZB0031 | Slug Test | 1.50E-05 |
| PZB0061 | Prova di pompaggio | 1.84E-04 |
| PZC0060 | Slug Test | 2.80E-05 |
| PZC0098 | Slug Test | 7.00E-06 |
| PZD0033 | Slug Test | 2.80E-05 |
| PZD0042 | Slug Test | 7.00E-06 |
| PZD0064 | Prova di pompaggio | 8.20E-05 |
| PZE0058 | Prova di pompaggio | 8.50E-05 |
| PZE0069 | Slug Test | 1.70E-05 |
| PZE0119 | Prova di pompaggio | 6.50E-05 |
| PZE0126 | Slug Test | 2.50E-05 |
| PZF0077 | Slug Test | 1.60E-05 |
| PZF0147 | Slug Test | 1.30E-05 |

In Figura 12 viene mostrata la distribuzione areale dei dati di permeabilità nel layer III. E' opportuno sottolineare come in tutti i layers del modello alle aree diaframmate interne allo stabilimento (discarica sud e discarica sud-est) è stato assegnato un valore di permeabilità molto basso ($1 \cdot 10^{-12}$ m/s) al fine di escludere tali aree dal dominio di modellazione in quanto isolate mediante diaframmi impermeabili dalla circostante circolazione idrica. Nei primi due layers è stato assegnato anche un valore di permeabilità e di porosità molto elevato ($1 \cdot 10^2$ m/s e 1) ad una area di limitata estensione presente all'interno di Micorosa lungo il suo confine Sud-Ovest. Tale area rappresenta infatti una zona di scavo (Area Cantiere) che drenando le acque di falda forma un piccolo specchio d'acqua che recapita attraverso un canale di scolo all'interno del C.le Pandi (Francani, 2011). Altra caratteristica degna di nota

del modello è che la permeabilità verticale è stata attribuita considerando un'anisotropia con rapporto K_v/K_h di 1/10.

3.3.2 POROSITÀ

Per quanto riguarda i valori di porosità efficace ed i coefficienti di immagazzinamento non sono stati reperiti dati ricavati dai test idraulici condotti in campo. In fase di calibrazione la scelta è stata quella di adottare un intervallo plausibile entro cui far variare tali valori: per lo Specific Yield (S_y) $0,2 \div 0,1$ e per l'immagazzinamento specifico (S_s) $1 \cdot 10^{-4} \div 1 \cdot 10^{-5}$ m⁻¹. Trattandosi di un acquifero prevalentemente freatico, il modello si è mostrato maggiormente sensibili a variazioni di S_y . Al termine del processo di calibrazione condotto in transitorio si sono adottati valori uniformi per tutti i layers pari a 0,1 e $1 \cdot 10^{-4}$ m⁻¹.

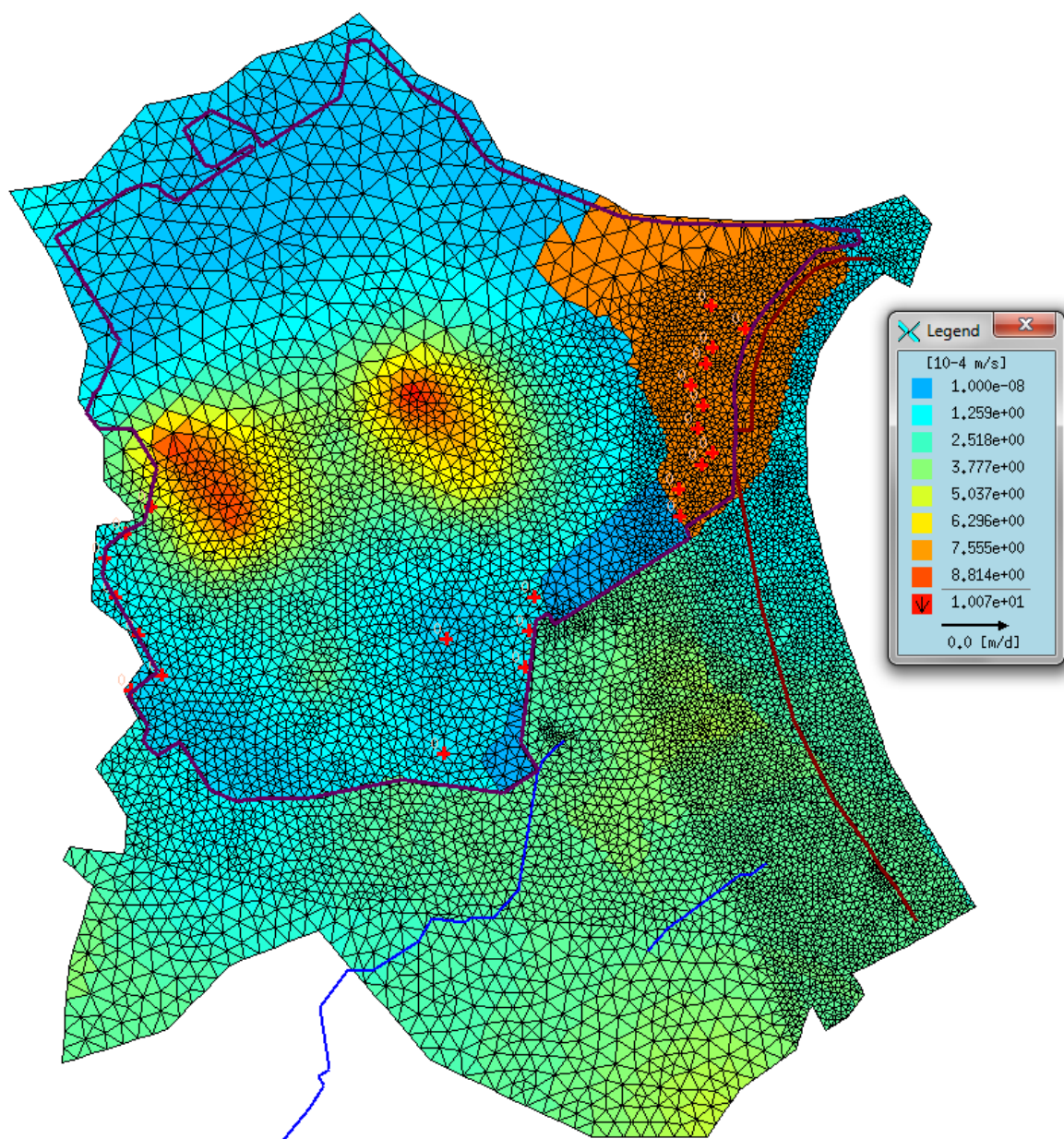


Figura 12 - Distribuzione della conducibilità idraulica orizzontale ($K_x = K_y$) nel layer III.

4 CALIBRAZIONE IN REGIME TRANSITORIO

4.1 PROCEDURA DI CALIBRAZIONE

La calibrazione del modello è stata condotta in due fasi: una prima calibrazione di massima condotta in stazionario sulla base dei dati piezometrici del Marzo 2011; la calibrazione vera e propria condotta in transitorio sul periodo Marzo 2010 Luglio 2011, mesi per i quali erano disponibili campagne piezometriche sufficientemente dettagliate. In particolare nel Luglio 2011 flusso (la piezometria elaborata è riportata in Figura 4), le misure di livello sono state raccolte in tutti i piezometri siti nelle Aree Esterne ed anche in alcuni interni allo stabilimento industriale (Francani, 2012). I target, ovvero i piezometri utilizzati in sede di calibrazione, sono stati posizionati sulla slice 4 (IV layer) e vengono mostrati in Figura 13. Si noti che nella zona posta tra il C.le Grande e il piezometro EP007 non è disponibile una rete piezometrica in quanto tale area non appartiene a Syndial.

La simulazione in transitorio è stata condotta utilizzando quale piezometria iniziale quella riprodotta dal modello stazionario per il mese di Marzo 2010 ed utilizzando quella del Luglio 2011 come target per la calibrazione. I valori di ricarica sono stati calcolati mensilmente in base ai dati termo-pluviometrici disponibili.

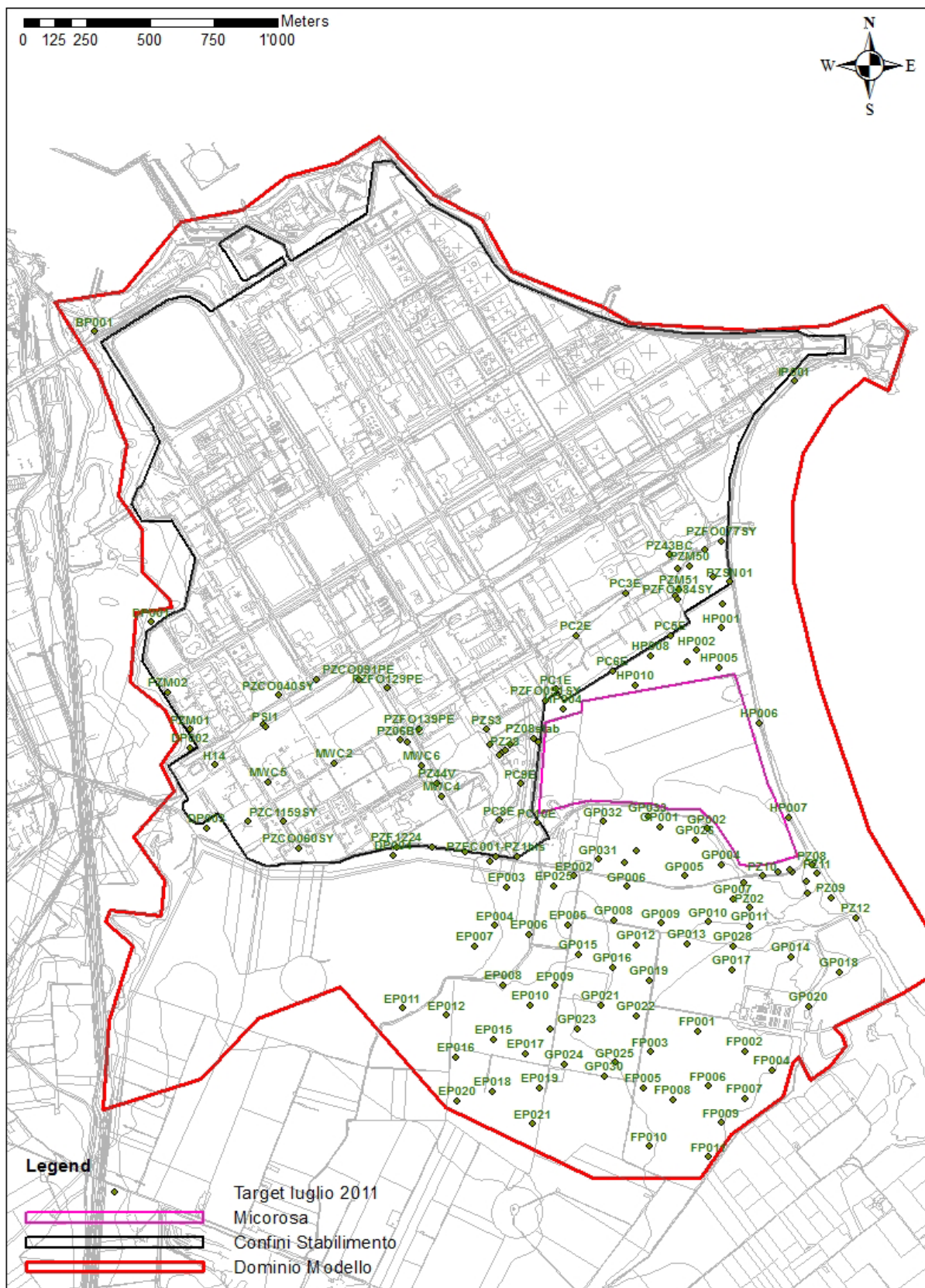


Figura 13 - Posizione dei piezometri utilizzati come target per la calibrazione.

La piezometria mostrata in Figura 15 è il risultato del modello calibrato ottenuto al termine della simulazione transitoria e corrispondente al luglio 2011.

La procedura di calibrazione consiste nel modificare i parametri dell'acquifero e le condizioni al contorno al fine di ottenere un modello adatto a simulare il flusso sotterraneo, minimizzando l'errore residuo ai target di calibrazione. Nel processo di calibrazione è stata utilizzata la procedura *Trial and error* al fine di minimizzare la differenza tra i livelli piezometrici simulati e quelli misurati (residui).

Il termine "parametri" indica, nell'ambito della calibrazione, tutte le variabili inserite all'interno del modello. Nell'insieme possono essere incluse non solo le proprietà della struttura idrogeologica (permeabilità, quote delle basi stratigrafiche, capacità di immagazzinamento etc.), ma anche le condizioni al contorno.

Il processo di calibrazione ha coinvolto in particolare i valori di permeabilità nelle Aree Esterne. Il confronto dei risultati delle prove di pompaggio e degli slug test ha messo in evidenza che questi ultimi fornivano valori leggermente sottostimati della conducibilità idraulica. Pertanto si sono incrementate tutte le permeabilità dei layer rappresentativi delle sabbie di un fattore pari a 2.5 per le zone interne allo stabilimento poste presso il confine sud e sud-est, mentre di un fattore pari a 6.25 per le zone esterne allo stabilimento. Inoltre, in base ai risultati delle indagini geofisiche e all'osservazione della morfologia piezometrica rilevata nelle diverse campagne piezometriche, si sono introdotti nell'ultimo layer alcuni paleoalvei, attribuendo valori di conducibilità idraulica prossimi al valore delle sovrastanti sabbie ocre del layer IV (Tabella 4). Infine lungo una fascia parallela alla linea di costa il valore di permeabilità è stato aumentato di un fattore 3 e dato l'esiguo numero di prove disponibili si è attribuito un valore uniforme (Tabella 4) nel layer V.

Le condizioni al contorno relative al mare nei nodi della prima slice sono passate da un valore di 0 m s.l.m.m. a -0,1 m s.l.m.m., maggiormente rappresentativo delle condizioni di marea registrate a luglio 2011 durante la giornata di misura dei livelli piezometrici nei punti posti lungo costa. Questa variazione ha conseguentemente comportato una variazione anche del livello idrico utilizzato per rappresentare il lago interno all'Oasi Protetta data la sua stretta connessione con i livelli marini. Per i laghi artificiali ad uso ittico il livello idrico è stato portato a 0,5 m s.l.m.m. utilizzando il GP018 quale punto di misura di riferimento data la sua estrema vicinanza agli specchi d'acqua.

Per quanto concerne i termini di ricarica superficiale si sono apportate modifiche solamente all'interno dello Stabilimento dove i valori impostati nel modello Environ sono stati decrementati del 29% per poter tenere in considerazione il periodo particolarmente poco piovoso registratosi da marzo a luglio 2011.

La Tabella 4 mostra i valori iniziali delle variabili sottoposte a calibrazione ed il valore impostato al termine della procedura.

Tabella 4 - Valori iniziali e finali dei parametri sottoposti a calibrazione.

| <i>Parametro</i> | <i>Nome</i> | <i>Valore iniziale</i> | <i>Valore stimato a calibrazione</i> |
|--------------------------|-----------------------|-------------------------------|---|
| K al layer III (m/s) | PZ2B | 2.00E-05 | 5.00E-05 |
| K al layer III (m/s) | PZ3B | 3.88E-04 | 9.70E-04 |
| K al layer III (m/s) | PZ4B | 3.63E-04 | 9.08E-04 |
| K al layer III (m/s) | PZ4C | 1.39E-04 | 3.48E-04 |
| K al layer III (m/s) | PZ4D | 4.17E-04 | 1.04E-03 |
| K al layer III (m/s) | PZ4E | 5.20E-05 | 1.30E-04 |
| K al layer III (m/s) | PZ4F | 2.10E-05 | 5.25E-05 |
| K al layer III (m/s) | PZ5B | 9.20E-05 | 2.30E-04 |
| K al layer III (m/s) | PZ5D | 2.53E-04 | 6.33E-04 |
| K al layer III (m/s) | PZ6A | 3.00E-05 | 7.50E-05 |
| K al layer III (m/s) | PZ6B | 1.40E-04 | 3.50E-04 |
| K al layer III (m/s) | PZ6C | 2.80E-05 | 7.00E-05 |
| K al layer III (m/s) | PZ6F | 3.30E-05 | 8.25E-05 |
| K al layer III (m/s) | PZ8F | 1.50E-05 | 3.75E-05 |
| K al layer III (m/s) | PZF0077 | 1.62E-05 | 4.05E-05 |
| K al layer III (m/s) | PZA0016 | 1.24E-05 | 3.10E-05 |
| K al layer III (m/s) | PZC0060 | 2.78E-05 | 6.95E-05 |
| K al layer III (m/s) | BP001 | 5.03E-05 | 1.26E-04 |
| K al layer III (m/s) | DP001 | 6.83E-05 | 1.71E-04 |
| K al layer III (m/s) | EP004 | 5.22E-05 | 3.26E-04 |
| K al layer III (m/s) | EP011 | 4.31E-05 | 2.69E-04 |
| K al layer III (m/s) | FP011 | 8.07E-05 | 5.04E-04 |
| K al layer III (m/s) | GP017 | 5.29E-05 | 3.31E-04 |
| K al layer III (m/s) | IP001 | 1.14E-05 | 7.13E-05 |
| K al layer III (m/s) | HP003 | 4.76E-05 | 2.98E-04 |
| K al layer V (m/s) | Paleoalvei | 2.75E-04 | 5.5E-04 |
| K al layer V (m/s) | Fascia linea di costa | 1.5E-04 | 4.5E-04 |
| Ricarica meteorica (m/d) | Area S-W del Polo | 4.93E-04 | 3.50E-04 |
| Ricarica meteorica | Area N-E del Polo | 2.74E-04 | 2.74E-04 |

| | | | |
|-----------------------------|---------------|-------------------|-------------------|
| (m/d) | | | |
| Ricarica meteorica (m/d) | Aree esterne | $0 \div 1,16E-03$ | $0 \div 1,16E-03$ |
| Livello idraulico (m) | Ittica | 0.8 | 0.5 |
| Livello idraulico (m) | Oasi protetta | 0.15 | -0.1 |
| Livello idraulico (m) | Mare | 0 | -0.1 |

Si osservino di seguito (Figura 14) i valori del carico idraulico ottenuti in seguito alla calibrazione e la relativa piezometria simulata (Figura 15).

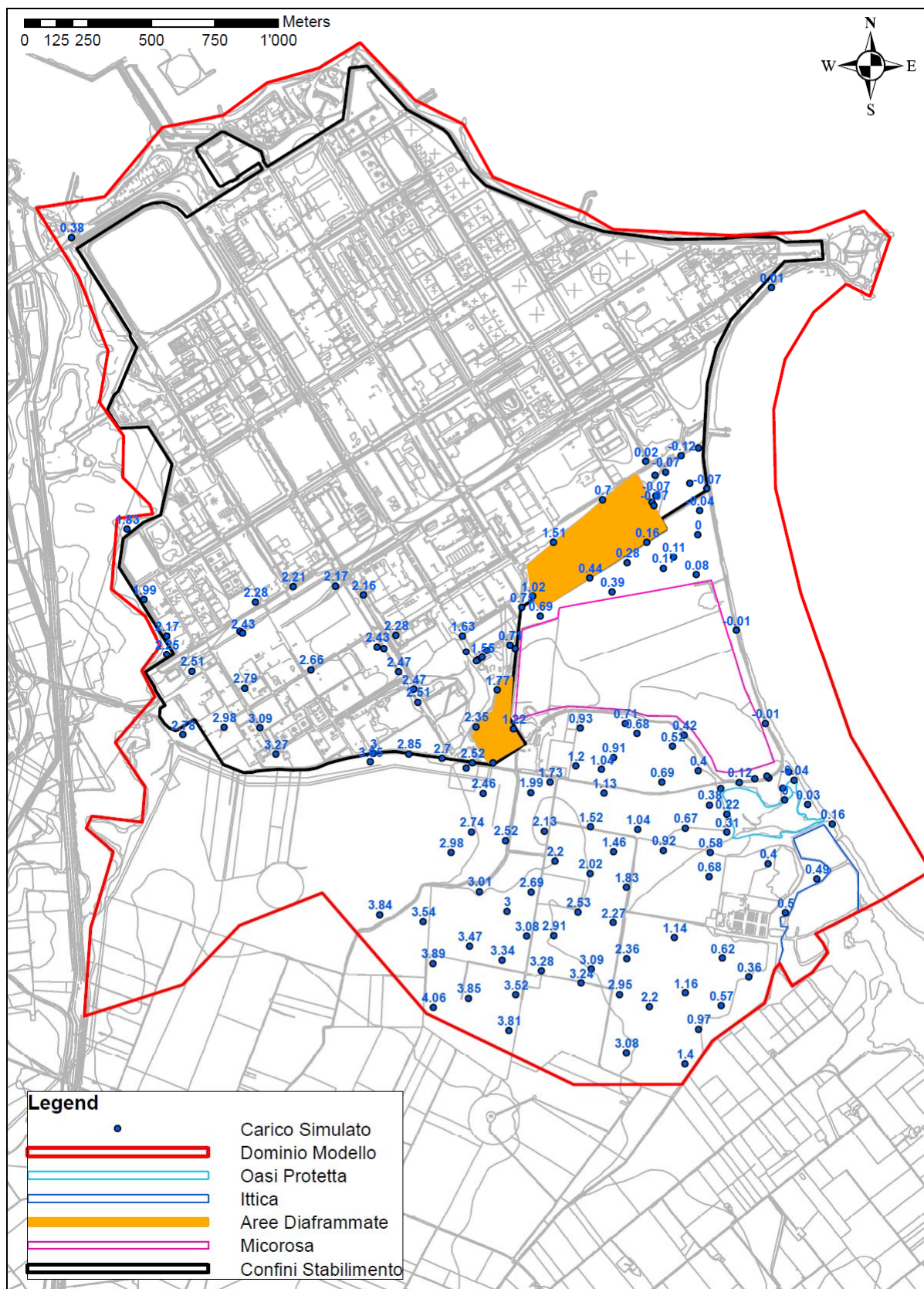


Figura 14 - Carico piezometrico simulato (lug. 2011) nell'acquifero sabbioso (layer 4) in condizioni di flusso in regime transitorio.

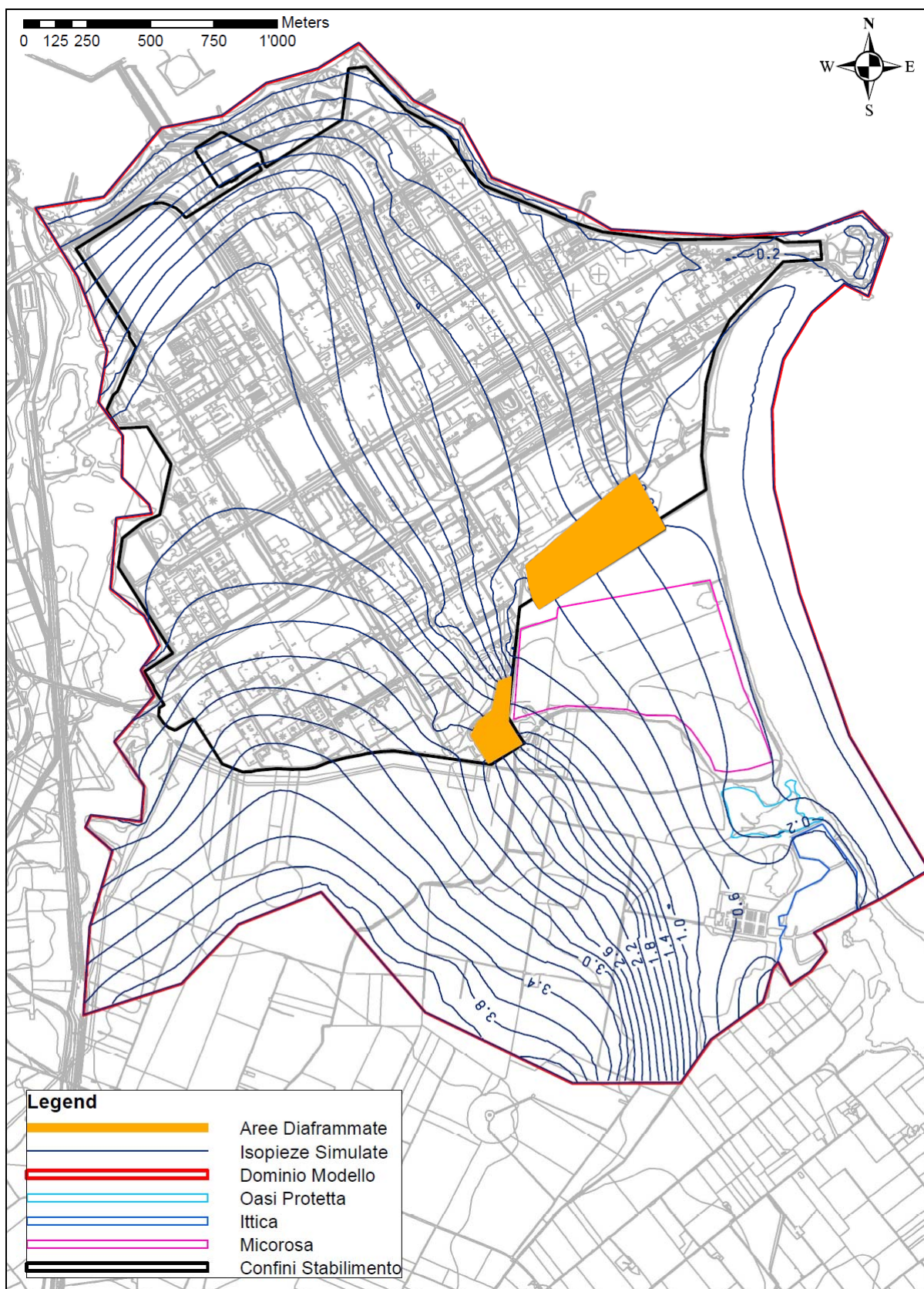


Figura 15 - Piezometria simulata (luglio 2011) nell'acquifero sabbioso (layer 4) in condizioni di flusso in regime transitorio.

Osservando i valori piezometrici simulati e l'andamento delle isopieze si nota che la falda è correttamente diretta verso Nord-Est in prossimità delle aree costiere, mentre verso Nord-Ovest in prossimità del C.le Grande. Direzioni della falda da ritenersi poco affidabili sono quelle relative alle aree settentrionali interne allo stabilimento in quanto non sono stati simulati tutti i pozzi barriera presenti e si è utilizzato un valore di permeabilità medio, non essendo l'andamento dei deflussi interni allo stabilimento scopo di questo lavoro.

In Figura 16 viene presentata una cartografia relativa alle differenze tra carico idraulico reale misurato e carico simulato mentre in Tabella 5 vengono riportati i valori di scostamento per ogni target. Si può osservare una leggera predominanza dei valori di residuo negativo, corrispondenti ad un carico misurato inferiore al carico simulato (ne è indice la media dei residui di -0.0613 m). Sporadicamente si osservano residui importanti dell'ordine dei 50 cm che richiederanno un approfondimento in merito al valore piezometrico misurato e la verifica delle quote topografiche dei punti di misura. In particolare si osservano residui elevati (si arriva sino al valore di 0.82 m nel piezometro PC4E) in corrispondenza dei piezometri PCE adiacenti alle Messe in Sicurezza Permanente Sud e Sud-Est. Tale errore è indubbiamente in parte legato al fatto che nel modello a queste due aree diaframmate è stato assegnato un valore di permeabilità estremamente basso (10^{-12} m/s). Non avendo però a disposizione nell'intorno di queste due aree una griglia particolarmente fitta, la posizione dei target ricade in maglie con nodi dotati di bassissima permeabilità con il conseguente calcolo errato del carico piezometrico. Si riporta di seguito una tabella che mostra il confronto tra carichi piezometrici misurati e quelli simulati per un totale di 144 piezometri indagati: rispetto ai dati utilizzati per generare la tavola piezometrica in Figura 4 sono stati eliminati l'EP022, l'EP023, l'EP024 e l'EP014 in quanto esterni al dominio della modellazione matematica.

Tabella 5 - Scostamento del livello piezometrico nei target utilizzati per la calibrazione

| Name | X | Y | H misurato | FLUSSO STAZIONARIO | |
|-------|-------------|-------------|------------|--------------------|---------|
| | | | | H simulato | Residuo |
| BP001 | 2772397.54 | 4503360.425 | 0.18 | 0.38 | -0.20 |
| DP001 | 2772616.696 | 4502215.039 | 1.88 | 1.83 | 0.05 |
| DP002 | 2772771.607 | 4501721.314 | 2.21 | 2.25 | -0.04 |
| DP003 | 2772836.606 | 4501403.483 | 2.47 | 2.78 | -0.31 |
| DP004 | 2773573.921 | 4501296.595 | 2.83 | 3.05 | -0.22 |
| EP001 | 2773951.418 | 4501271.506 | 2.58 | 2.57 | 0.01 |
| EP002 | 2774282.504 | 4501216.198 | 1.4 | 1.73 | -0.33 |
| EP003 | 2774019.276 | 4501171.931 | 2.57 | 2.46 | 0.11 |
| EP004 | 2773972.143 | 4501020.04 | 2.74 | 2.74 | 0.00 |
| EP005 | 2774259.355 | 4501023.252 | 1.68 | 2.13 | -0.45 |
| EP006 | 2774106.169 | 4500986.384 | 2.35 | 2.52 | -0.17 |
| EP007 | 2773892.448 | 4500939.981 | 3.06 | 2.98 | 0.08 |
| EP008 | 2774004.107 | 4500785.184 | 3.19 | 3.01 | 0.18 |
| EP009 | 2774207.274 | 4500783.323 | 3.08 | 2.69 | 0.39 |
| EP010 | 2774112.565 | 4500706.927 | 3.15 | 3.00 | 0.15 |
| EP011 | 2773611.301 | 4500694.816 | 3.74 | 3.84 | -0.10 |
| EP012 | 2773781.795 | 4500667.383 | 3.7 | 3.54 | 0.16 |
| EP013 | 2774190.449 | 4500611.492 | 2.92 | 3.08 | -0.16 |
| EP015 | 2773965.209 | 4500570.087 | 3.58 | 3.47 | 0.11 |
| EP016 | 2773820.564 | 4500502.954 | 3.81 | 3.89 | -0.08 |
| EP017 | 2774092.75 | 4500515.963 | 3.54 | 3.34 | 0.20 |
| EP018 | 2773960.647 | 4500366.03 | 3.87 | 3.85 | 0.02 |
| EP019 | 2774147.077 | 4500380.176 | 3.69 | 3.52 | 0.17 |
| EP020 | 2773822.353 | 4500330.199 | 4.07 | 4.06 | 0.01 |
| EP021 | 2774119.83 | 4500238.614 | 3.75 | 3.81 | -0.06 |
| EP025 | 2774205.716 | 4501175.405 | 1.5 | 1.99 | -0.49 |
| FP001 | 2774771.519 | 4500605.306 | 1.34 | 1.14 | 0.20 |
| FP002 | 2774959.935 | 4500524.027 | 0.66 | 0.62 | 0.04 |
| FP003 | 2774584.815 | 4500522.281 | 2.39 | 2.36 | 0.03 |
| FP004 | 2775064.541 | 4500450.432 | 0.26 | 0.36 | -0.10 |
| FP005 | 2774555.979 | 4500380.732 | 3.14 | 2.95 | 0.19 |
| FP006 | 2774814.327 | 4500387.506 | 1.21 | 1.16 | 0.05 |
| FP007 | 2774956.184 | 4500337.838 | 0.61 | 0.57 | 0.04 |
| FP008 | 2774673.777 | 4500333.188 | 2.29 | 2.20 | 0.09 |
| FP009 | 2774866.124 | 4500244.239 | 0.95 | 0.97 | -0.02 |
| FP010 | 2774581.902 | 4500151.032 | 3.23 | 3.08 | 0.15 |
| FP011 | 2774812.518 | 4500108.628 | 1.38 | 1.40 | -0.02 |
| GP001 | 2774624.349 | 4501407.582 | 0.6 | 0.68 | -0.08 |
| GP002 | 2774810.328 | 4501401.534 | 0.41 | 0.42 | -0.01 |

| | | | | | |
|-------|-------------|-------------|-------|-------|-------|
| GP003 | 2774531.629 | 4501313.38 | 0.9 | 0.91 | -0.01 |
| GP004 | 2774865.106 | 4501260.864 | 0.65 | 0.40 | 0.25 |
| GP005 | 2774723.009 | 4501215.886 | 0.43 | 0.69 | -0.26 |
| GP006 | 2774494.719 | 4501173.594 | 1.19 | 1.13 | 0.06 |
| GP007 | 2774910.014 | 4501125.861 | 0.85 | 0.38 | 0.47 |
| GP008 | 2774441.495 | 4501040.725 | 1.49 | 1.52 | -0.03 |
| GP009 | 2774626.834 | 4501030.182 | 1.12 | 1.04 | 0.08 |
| GP010 | 2774814.605 | 4501034.858 | 0.44 | 0.67 | -0.23 |
| GP011 | 2774978.909 | 4501019.586 | 0.25 | 0.31 | -0.06 |
| GP012 | 2774532.221 | 4500942.62 | 1.45 | 1.46 | -0.01 |
| GP013 | 2774728.169 | 4500947.317 | 1.01 | 0.92 | 0.09 |
| GP014 | 2775141.077 | 4500895.671 | 0.56 | 0.40 | 0.16 |
| GP015 | 2774301.899 | 4500905.776 | 2.04 | 2.20 | -0.16 |
| GP016 | 2774439.3 | 4500855.791 | 1.85 | 2.02 | -0.17 |
| GP017 | 2774908.779 | 4500844.59 | 0.89 | 0.68 | 0.21 |
| GP018 | 2775332.286 | 4500836.29 | 0.53 | 0.49 | 0.04 |
| GP019 | 2774582.19 | 4500803.24 | 1.57 | 1.83 | -0.26 |
| GP020 | 2775209.157 | 4500702.983 | 0.85 | 0.50 | 0.35 |
| GP021 | 2774392.053 | 4500705.366 | 2.87 | 2.53 | 0.34 |
| GP022 | 2774530.43 | 4500664.363 | 2.04 | 2.27 | -0.23 |
| GP023 | 2774296.372 | 4500613.07 | 3.07 | 2.91 | 0.16 |
| GP024 | 2774247.571 | 4500474.56 | 3.64 | 3.28 | 0.36 |
| GP025 | 2774444.77 | 4500481.094 | 3.29 | 3.09 | 0.20 |
| GP026 | 2774764.446 | 4501357.128 | 0.4 | 0.52 | -0.12 |
| GP027 | 2774484.14 | 4501266.542 | 1.05 | 1.04 | 0.01 |
| GP028 | 2774912.356 | 4500939.082 | 0.59 | 0.58 | 0.01 |
| GP030 | 2774404.84 | 4500426.132 | 3.57 | 3.24 | 0.33 |
| GP031 | 2774382.607 | 4501280.93 | 1.27 | 1.20 | 0.07 |
| GP032 | 2774400.743 | 4501429.632 | 1.07 | 0.93 | 0.14 |
| GP033 | 2774578.856 | 4501447.575 | 0.79 | 0.71 | 0.08 |
| H14 | 2772871.848 | 4501652.412 | 2.22 | 2.51 | -0.29 |
| OP001 | 2775142.92 | 4501232.80 | -0.14 | 0.02 | -0.16 |
| HP001 | 2774863.56 | 4502192.55 | -0.06 | 0.00 | -0.06 |
| HP002 | 2774768.02 | 4502104.84 | -0.2 | 0.11 | -0.31 |
| HP003 | 2774728.767 | 4502060.085 | 0.06 | 0.17 | -0.11 |
| HP004 | 2774242.747 | 4501873.101 | 0.32 | 0.69 | -0.37 |
| HP005 | 2774857.142 | 4502035.72 | 0.03 | 0.08 | -0.05 |
| HP006 | 2775016.19 | 4501816.981 | 0.01 | -0.01 | 0.02 |
| HP007 | 2775129.67 | 4501447.50 | -0.02 | -0.01 | -0.01 |
| HP008 | 2774585.01 | 4502082.739 | 0.2 | 0.28 | -0.08 |
| HP009 | 2774871.21 | 4502288.09 | -0.14 | -0.04 | -0.10 |
| HP010 | 2774526.777 | 4501968.209 | 0.25 | 0.39 | -0.14 |
| IP001 | 2775153.38 | 4503164.05 | -0.17 | 0.01 | -0.18 |

| | | | | | |
|-----------|-------------|-------------|-------|-------|-------|
| MWC1 | 2773628.279 | 4501744.322 | 2.44 | 2.42 | 0.02 |
| MWC2 | 2773340.366 | 4501658.658 | 2.77 | 2.66 | 0.11 |
| MWC3 | 2773061.076 | 4501812.537 | 2.28 | 2.41 | -0.13 |
| MWC4 | 2773761.067 | 4501530.563 | 2.67 | 2.51 | 0.16 |
| MWC5 | 2773079.78 | 4501585.855 | 2.47 | 2.79 | -0.32 |
| MWC6 | 2773685.995 | 4501650.508 | 2.76 | 2.47 | 0.29 |
| PC1E | 2774219.55 | 4501951.706 | 0.31 | 1.02 | -0.71 |
| PC2E | 2774301.658 | 4502151.874 | 0.65 | 1.51 | -0.86 |
| PC3E | 2774491.77 | 4502323.585 | 0.27 | 0.70 | -0.43 |
| PC4E | 2774675.732 | 4502315.465 | -0.16 | -0.98 | 0.82 |
| PC5E | 2774662.963 | 4502162.278 | 0.07 | 0.16 | -0.09 |
| PC6E | 2774437.644 | 4502022.866 | 0.21 | 0.44 | -0.23 |
| PC7E | 2774058.213 | 4501292.64 | 2.3 | 2.26 | 0.04 |
| PC8E | 2773991.029 | 4501433.953 | 2.04 | 2.35 | -0.31 |
| PC9E | 2774078.383 | 4501577.549 | 1.9 | 1.77 | 0.13 |
| PC10E | 2774135.796 | 4501424.133 | 1.16 | 1.22 | -0.06 |
| PZ01 | 2774953.765 | 4501190.647 | 0.27 | 0.24 | 0.03 |
| PZ02 | 2774978.859 | 4501090.246 | 0.22 | 0.22 | 0.00 |
| PZ03 | 2775136.51 | 4501240.88 | -0.14 | 0.02 | -0.16 |
| PZ04 | 2775087.91 | 4501230.47 | -0.15 | 0.06 | -0.21 |
| PZ06 | 2775198.99 | 4501192.56 | -0.13 | -0.01 | -0.12 |
| PZ07 | 2775206.44 | 4501147.12 | -0.12 | 0.00 | -0.12 |
| PZ08 | 2775222.20 | 4501257.18 | -0.13 | -0.04 | -0.09 |
| PZ09 | 2775297.03 | 4501129.16 | -0.07 | 0.03 | -0.10 |
| PZ10 | 2775027.76 | 4501215.32 | -0.03 | 0.12 | -0.15 |
| PZ11 | 2775242.49 | 4501224.34 | -0.08 | -0.04 | -0.04 |
| PZ12 | 2775393.967 | 4501051.316 | -0.2 | 0.16 | -0.36 |
| PZ39E | 2772998.727 | 4501432.282 | 2.65 | 2.98 | -0.33 |
| PZ44V | 2773745.497 | 4501581.932 | 2.6 | 2.47 | 0.13 |
| PZ48R | 2773726.174 | 4501327.097 | 2.73 | 2.85 | -0.12 |
| PZ5B | 2773269.997 | 4501988.414 | 2.28 | 2.21 | 0.07 |
| PZCO040SY | 2773121.251 | 4501928.09 | 2.25 | 2.28 | -0.03 |
| PZCO060SY | 2773201.619 | 4501325.902 | 3.07 | 3.27 | -0.20 |
| PZCO091PE | 2773437.723 | 4501990.415 | 2.25 | 2.17 | 0.08 |
| PZC1159SY | 2773139.304 | 4501430.195 | 2.95 | 3.09 | -0.14 |
| PZFO075SY | 2774695.182 | 4502425.482 | -0.17 | -0.05 | -0.12 |
| PZFO077SY | 2774867.048 | 4502533.134 | -0.24 | -0.09 | -0.15 |
| PZFO084SY | 2774691.686 | 4502307.485 | -0.17 | -0.07 | -0.10 |
| PZFO086SY | 2774832.121 | 4502393.931 | -0.14 | -0.07 | -0.07 |
| PZFO091SY | 2774170.505 | 4501907.126 | 0.36 | 0.75 | -0.39 |
| PZFO092SY | 2773951.175 | 4501731.495 | 1.23 | 1.74 | -0.51 |
| PZFO101 | 2774145.116 | 4501743.869 | 0.25 | 0.61 | -0.36 |
| PZ117SY | 2773857.187 | 4501309.685 | 2.58 | 2.70 | -0.12 |

| | | | | | |
|----------------|-------------|-------------|-------|-------|-------|
| PZFO129PE | 2773546.934 | 4501955.113 | 2.19 | 2.16 | 0.03 |
| PZFO139PE | 2773674.533 | 4501796.2 | 2 | 2.28 | -0.28 |
| PZF1224 | 2773585.949 | 4501329.884 | 2.77 | 3.00 | -0.23 |
| PZM01 | 2772772.444 | 4501793.112 | 2.15 | 2.17 | -0.02 |
| PZM02 | 2772683.141 | 4501937.723 | 2.05 | 1.99 | 0.06 |
| PZM49 | 2774798.868 | 4502502.478 | -0.28 | -0.12 | -0.16 |
| PZM50 | 2774737.741 | 4502437.618 | -0.16 | -0.07 | -0.09 |
| PZM51 | 2774698.023 | 4502345.155 | -0.19 | -0.07 | -0.12 |
| PZS3 | 2773937.647 | 4501793.138 | 1.07 | 1.63 | -0.56 |
| PZ43BC | 2774659.046 | 4502480.25 | -0.13 | 0.02 | -0.15 |
| PSI1 | 2773070.85 | 4501804.986 | 2.34 | 2.43 | -0.09 |
| PZ06BC | 2773600.376 | 4501750.925 | 2.5 | 2.43 | 0.07 |
| PZ01stab | 2774033.607 | 4501735.486 | 0.95 | 1.39 | -0.44 |
| PZ08stab | 2774124.279 | 4501758.2 | 0.32 | 0.71 | -0.39 |
| PZ15stab | 2773999.846 | 4501699.174 | 1.31 | 1.64 | -0.33 |
| PZ27 | 2773991.725 | 4501693.482 | 1.32 | 1.68 | -0.36 |
| PZ28 | 2774013.997 | 4501709.05 | 1.28 | 1.55 | -0.27 |
| PZEC001-PZ1bis | 2773975.823 | 4501292.693 | 2.61 | 2.52 | 0.09 |
| PZSN01 | 2774899.934 | 4502373.248 | -0.1 | -0.07 | -0.03 |

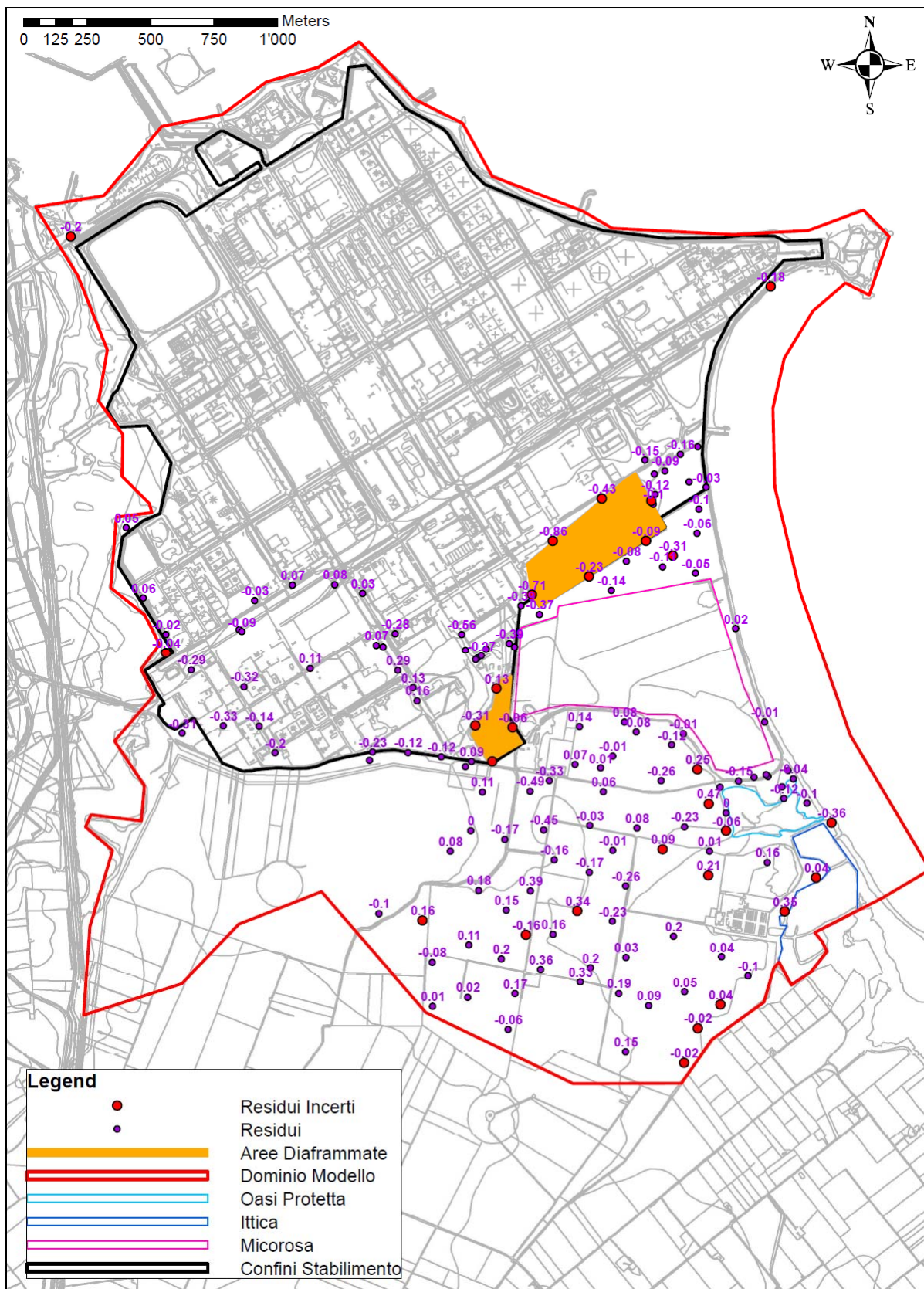


Figura 16 - Residui stimati in tutti i target importati nel modello per la simulazione in regime transitorio (simulato-misurato a lug. 2011).

Per tale ragione i piezometri PCE nella Figura 16 vengono definiti incerti. Anche per altri punti le misure piezometriche effettuate a luglio 2011 mostrano alcune incertezze. Al fine di isolare le misure incerte in una prima fase si è effettuato un confronto tra le misure piezometriche del luglio 2010 e quelle del luglio 2011. Essendo a disposizione queste due campagne aventi condizioni idrogeologiche simili (precipitazioni pressoché identiche nel semestre antecedente al mese campionato) si è osservato di quanto differissero i valori misurati tra le due campagne di misura, selezionando nello specifico tutti i piezometri in cui il carico differiva di un valore strettamente maggiore di 20 cm (indice probabile di un carico misurato affetto da errore). Successivamente, al fine di capire quale misura fosse più attendibile è stato effettuato un confronto a più larga scala, comprendendo anche le misure piezometriche eseguite in marzo 2010, ottobre 2011 e gennaio 2012.

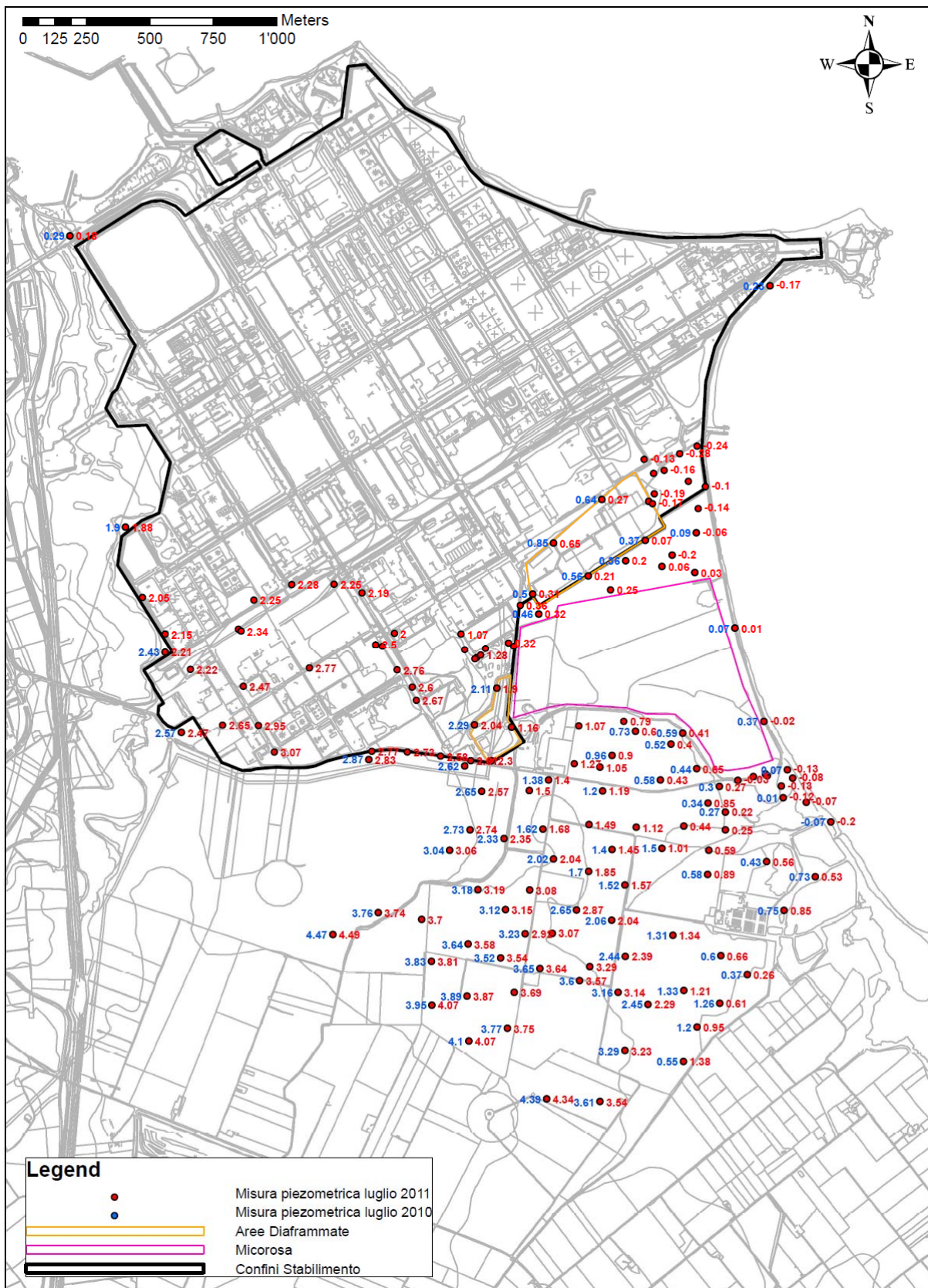


Figura 17 - Confronto tre le campagne piezometriche del 2010 e del 2011.

In alcuni piezometri, come il GP004, GP007 (Figura C 2 in allegato), GP021 (Figura C 1 in allegato) e l'HP002 (Figura C 4 in allegato), la misura piezometrica del luglio 2011 non risulta in linea con quella dei piezometri adiacenti, di conseguenza si potrebbe non considerare il valore del carico misurato ai fini della calibrazione e del calcolo dell'errore medio assoluto del modello. Particolare è il caso del piezometro GP020 (Figura C 3 in allegato) che, nonostante la forte vicinanza ai laghi artificiale, mostra un livello idrico superiore di circa 30 cm in ogni campagna piezometrica; ciò è dovuto con tutta probabilità agli accumuli d'acqua presenti nei pressi del suddetto piezometro, probabilmente derivanti da perdite o scarichi delle vasche dell'allevamento ittico adiacente.

Altri piezometri la cui misura risulta incerta sono quelli siti in prossimità della costa (Figura C 5 in allegato), in quanto soggetti all'azione della marea. I dati risultano validi solamente se la misura piezometrica viene effettuata nello stesso istante, mentre se è effettuata a diversi istanti come nel caso indagato (nello specifico misure eseguite in un intervallo di tempo pari circa a 3 ore) vi è il rischio che si osservino oscillazioni del carico dovute all'azione della marea. Ciò ha come conseguenza un valore più elevato nei residui in quanto nel modello è possibile assegnare solamente un livello idraulico costante relativo ad un determinato istante ai nodi rappresentanti il mare. Ad ulteriore conferma di quanto detto, osservando il rilievo in continuo del carico idraulico in un punto sito in prossimità della costa (Figura 18), si nota un'oscillazione del carico massima pari a circa 20 – 30 cm in un arco temporale di 3 ore, in funzione del momento della giornata in cui si campiona (Figura 19). Di conseguenza è lecito considerare le misure dell'IP007 e del PZ12, siti agli estremi del dominio, poco affidabili in quanto effettuate probabilmente all'inizio e fine dell'intervallo di campionamento.



Figura 18 - Posizione del mareografo Punto Mare

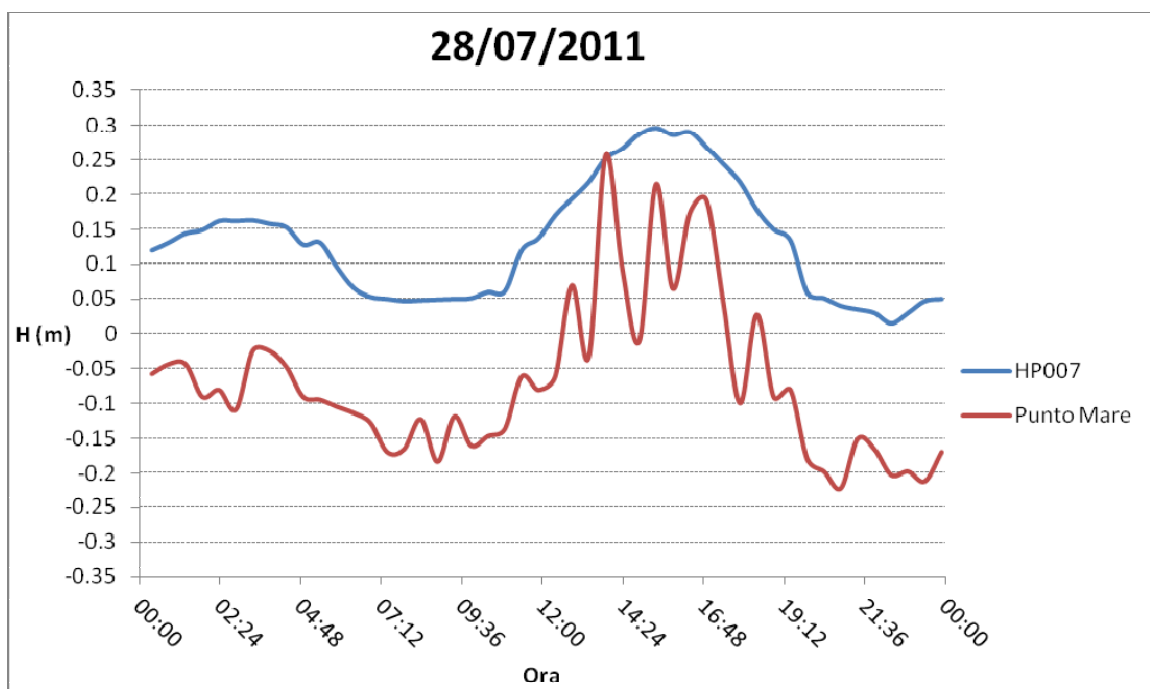


Figura 19 - Andamento dei carichi idraulici nel piezometro HP007 e nel mareografo, durante la giornata del 28/07/2011

Riassumendo in Tabella 6 le caratteristiche dei residui e dei livelli misurati, si nota che considerare validi i valori dei piezometri incerti conduce ad un errore medio assoluto pari a 17.3 cm, al contrario del caso in cui si preferisce non tenere conto dei suddetti piezometri che permette di ottenere un errore medio assoluto pari a 14.9 cm. Tale differenza in entrambi i casi si ripercuote nell'errore percentuale del modello, funzione dello scarto quadratico medio e della differenza tra i livelli idraulici misurati, ove si osserva un 3.58 % nel caso si includano nell'analisi tutti i piezometri contro un 2.82 % nel caso opposto. In entrambe le situazioni comunque l'errore è accettabile ed è indice di una buona affidabilità del modello numerico di flusso.

Tabella 6 - Statistiche di sintesi per la calibrazione.

| | Flusso | Flusso senza piezometri incerti |
|---|----------------|--|
| Numero di target | 144 | 127 |
| Media dei residui (H misurato – H simulato) | -0.0613 m | -0.0606 m |
| Media del valore assoluto dei residui | 0.173 m | 0.149 m |
| Residuo minimo | -0.857 m | -0.560 |
| Residuo massimo | 0.820 m | 0.394 |
| Livello misurato minimo | -0.28 m s.l.m. | |
| Livello misurato massimo | 4.07 m s.l.m. | |
| Estensione dei livelli misurati | 4.35 m | |
| sqm (residui) | 0.156 m | 0.123 m |
| sqm(residui)/estensione(livelli misurati) | 3.58 % | 2.82 % |

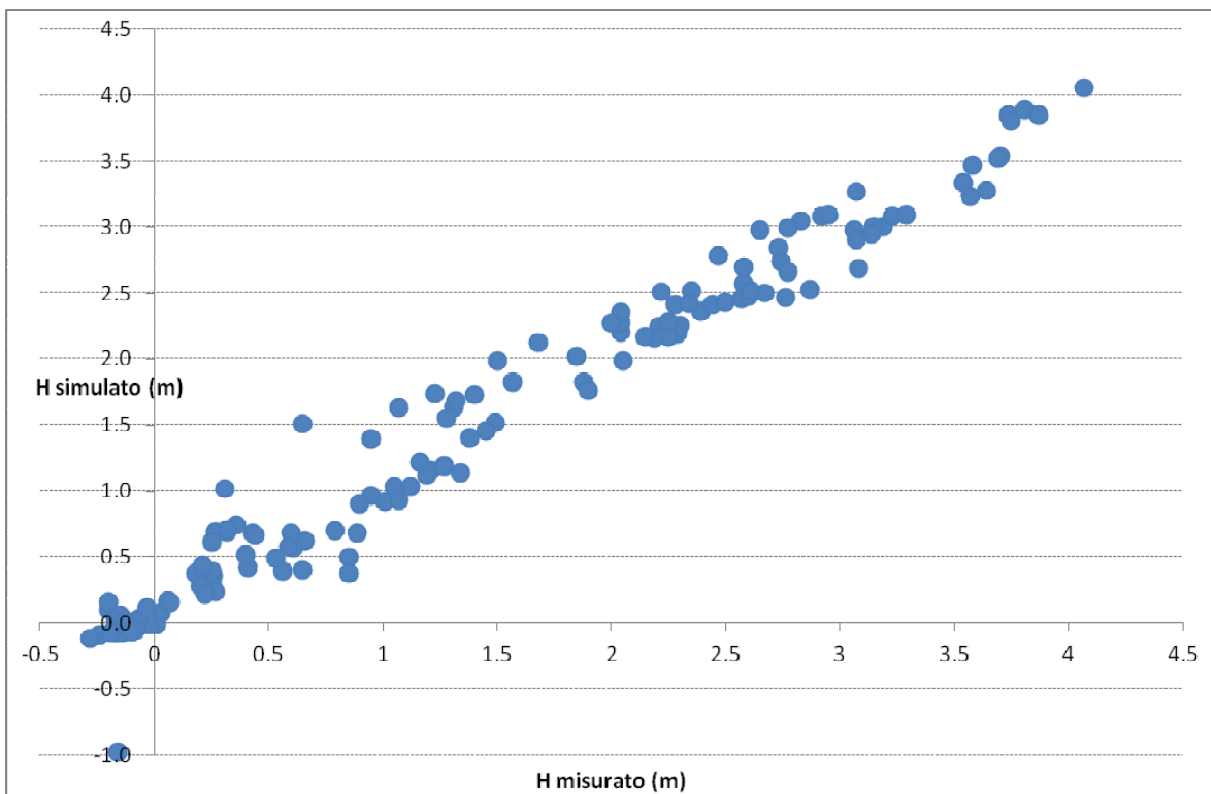


Figura 20 - Confronto dei carichi idraulici misurati nella campagna piezometrica di luglio 2011 con quelli simulati dal modello numerico di flusso

BIBLIOGRAFIA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

Aquater (2004). "Piano di caratterizzazione dei terreni e delle acque sotterranee nelle aree di proprietà Syndial presso lo Stabilimento Multisocietario di Brindisi: Relazione tecnica Descrittiva", marzo 2004

ERM (2010). "Relazione tecnica descrittiva delle indagini di caratterizzazione – Aree Esterne al Sito Multisocietario di Brindisi", dicembre 2010

ENICHEM S.P.A. (1998). *Stabilimento di Brindisi. Messa in sicurezza aree Sud e Sud-Est. Progetto esecutivo. Elaborato A: Stato di fatto e premesse di progetto. Doc. N. 96-012/R04-2*

Diersch H.-J. G. (2006). *WASY Software Feflow 5.3 (Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System) – User's Manual*. WASY GmbH Institute for Water Resources Planning and Systems Research.

Prof. V. Francani (2012). "Indagini di approfondimento per la caratterizzazione delle aree esterne Syndial E, G e H", luglio 2012

Prof. V. Francani (2011). "Indagini di caratterizzazione delle aree esterne Syndial – Sintesi", febbraio 2011

Motz, L. and Sedighi, A. (2009). *Representing the Coastal Boundary Condition in Regional Groundwater Flow Models*. J. Hydrol. Eng., 14(8), 821–831.

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

ALLEGATI

ALLEGATO A

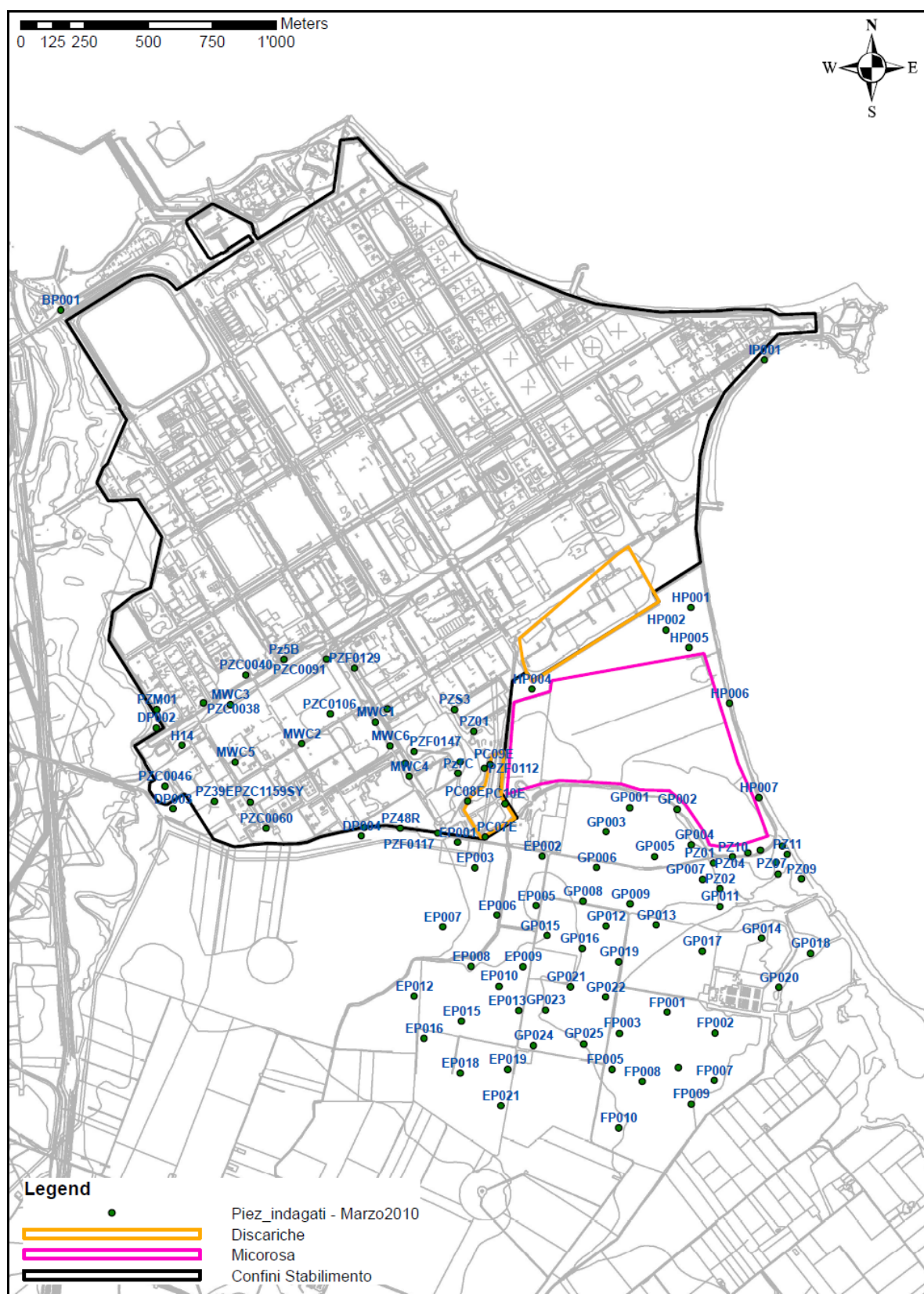


Figura A 1 - Planimetria dell'area ed indagini eseguite nel mese di marzo 2010.

Modello matematico di flusso delle aree esterne all'area del polo industriale di Brindisi - AMB-BR 1/12/2 -GIU. 2012

[illegible]

Modello matematico di flusso delle aree esterne all'area del polo industriale di Brindisi - AMB-BR 1/12/2 -GIU. 2012

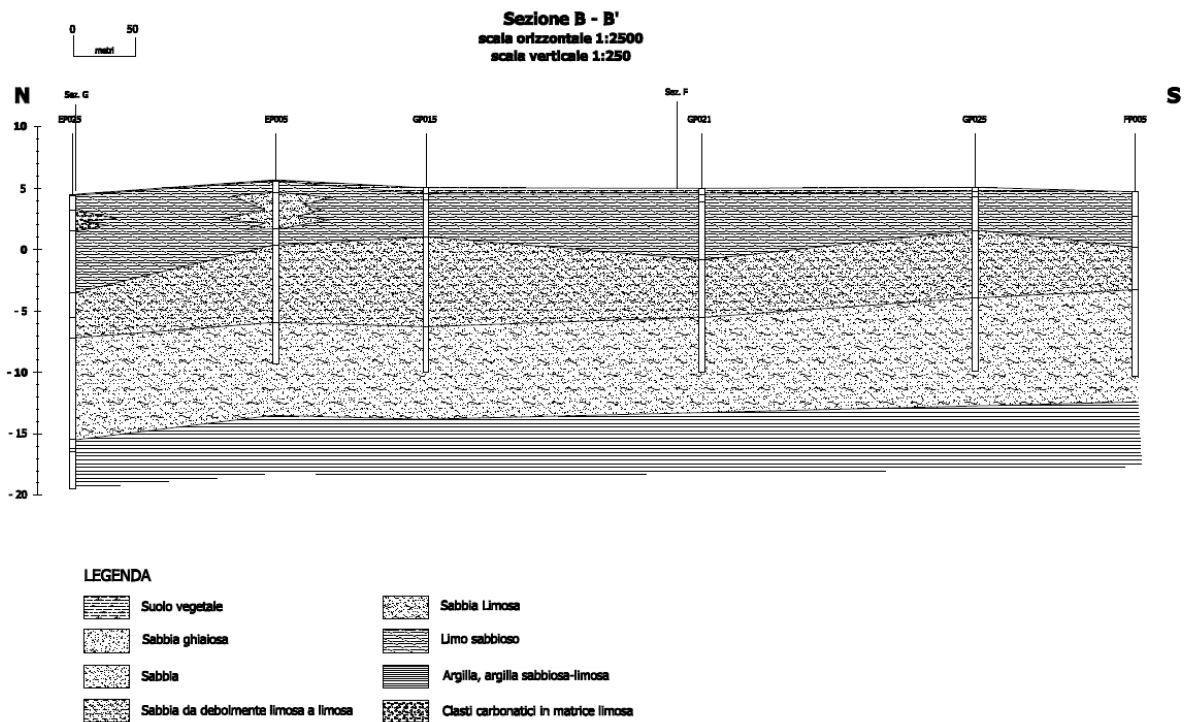


Figura B 2 - Sezione geologica B-B' eseguita nelle aree esterne.

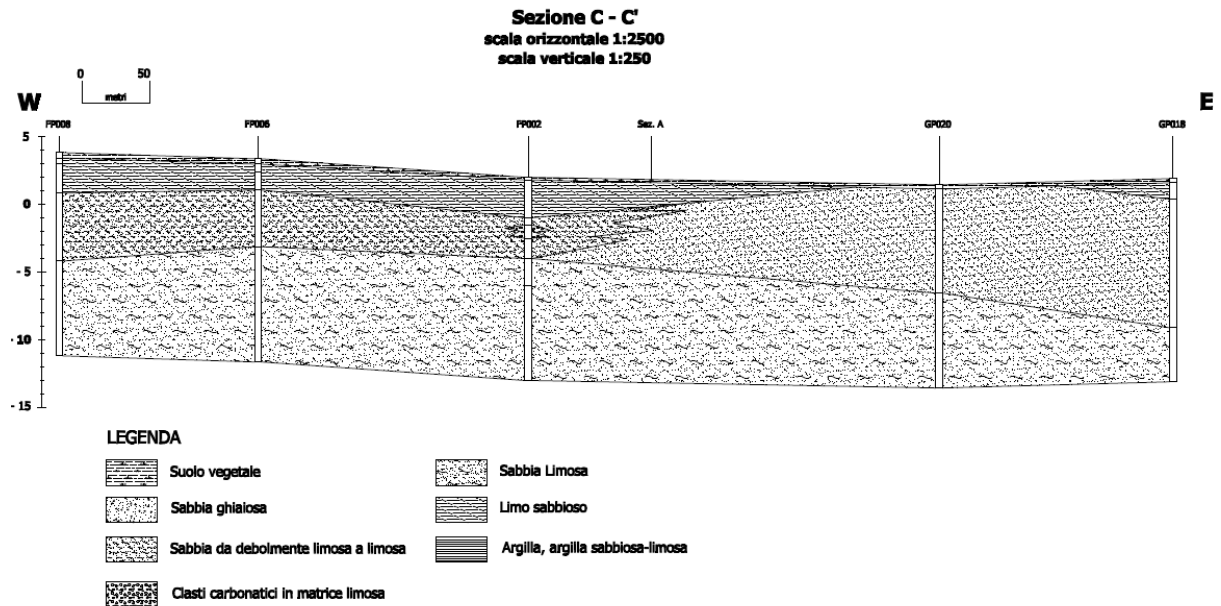


Figura B 3 - Sezione geologica C-C' eseguita nelle aree esterne.

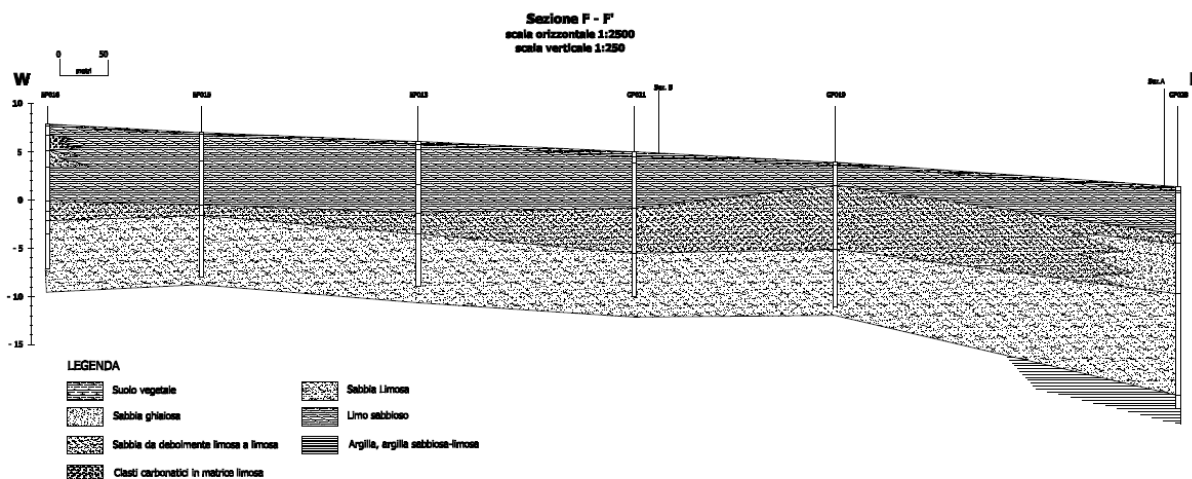


Figura B 4 - Sezione geologica F-F' eseguita nelle aree esterne.

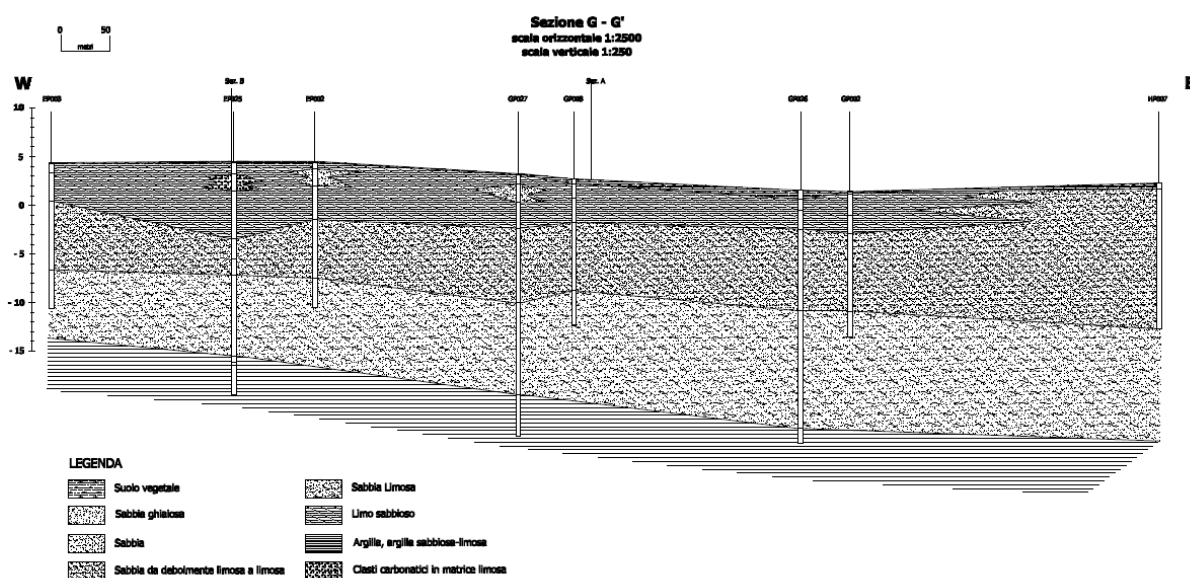


Figura B 5 - Sezione geologica G-G' eseguita nelle aree esterne.

ALLEGATO C

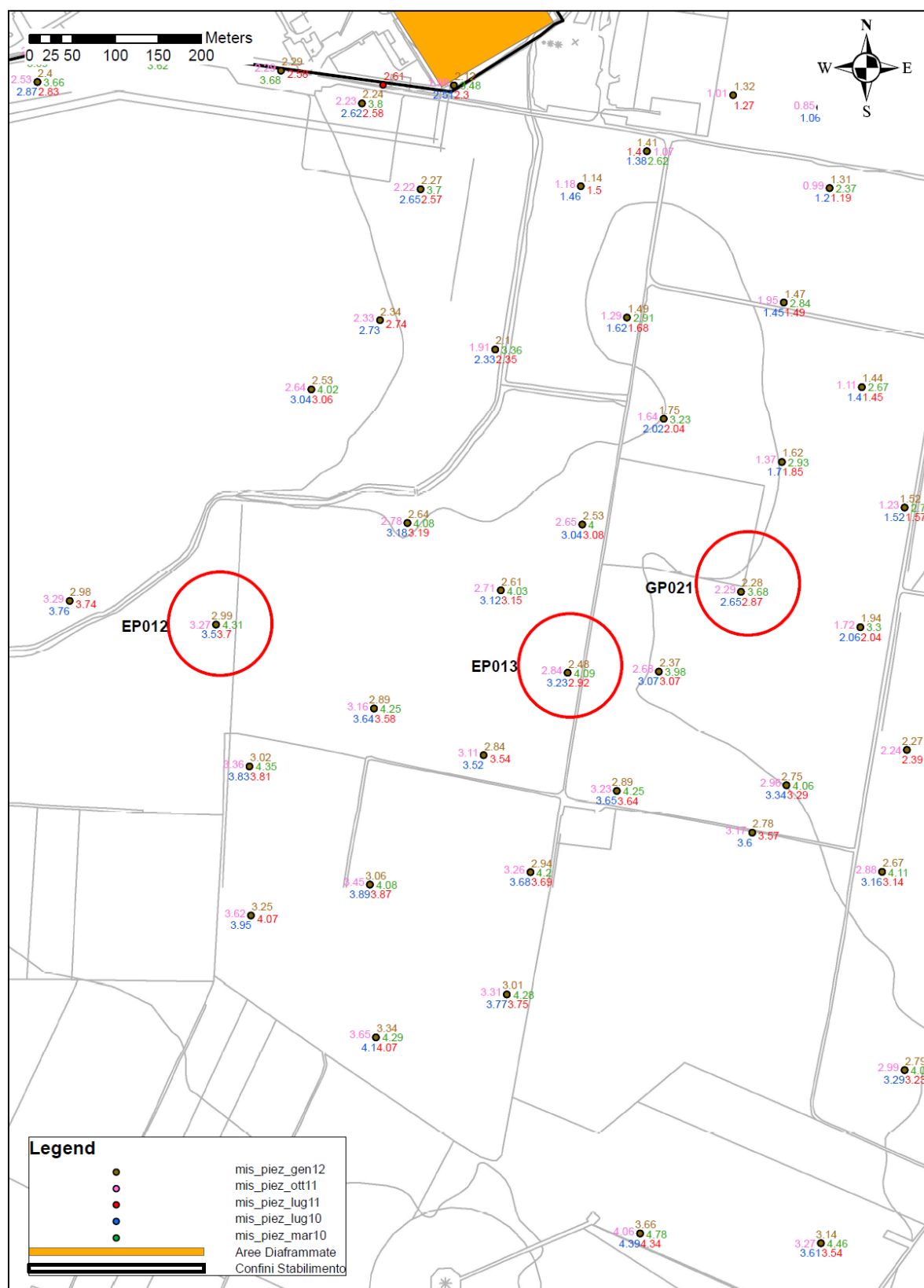


Figura C 1 - Misure rilevate nelle diverse campagne piezometriche.

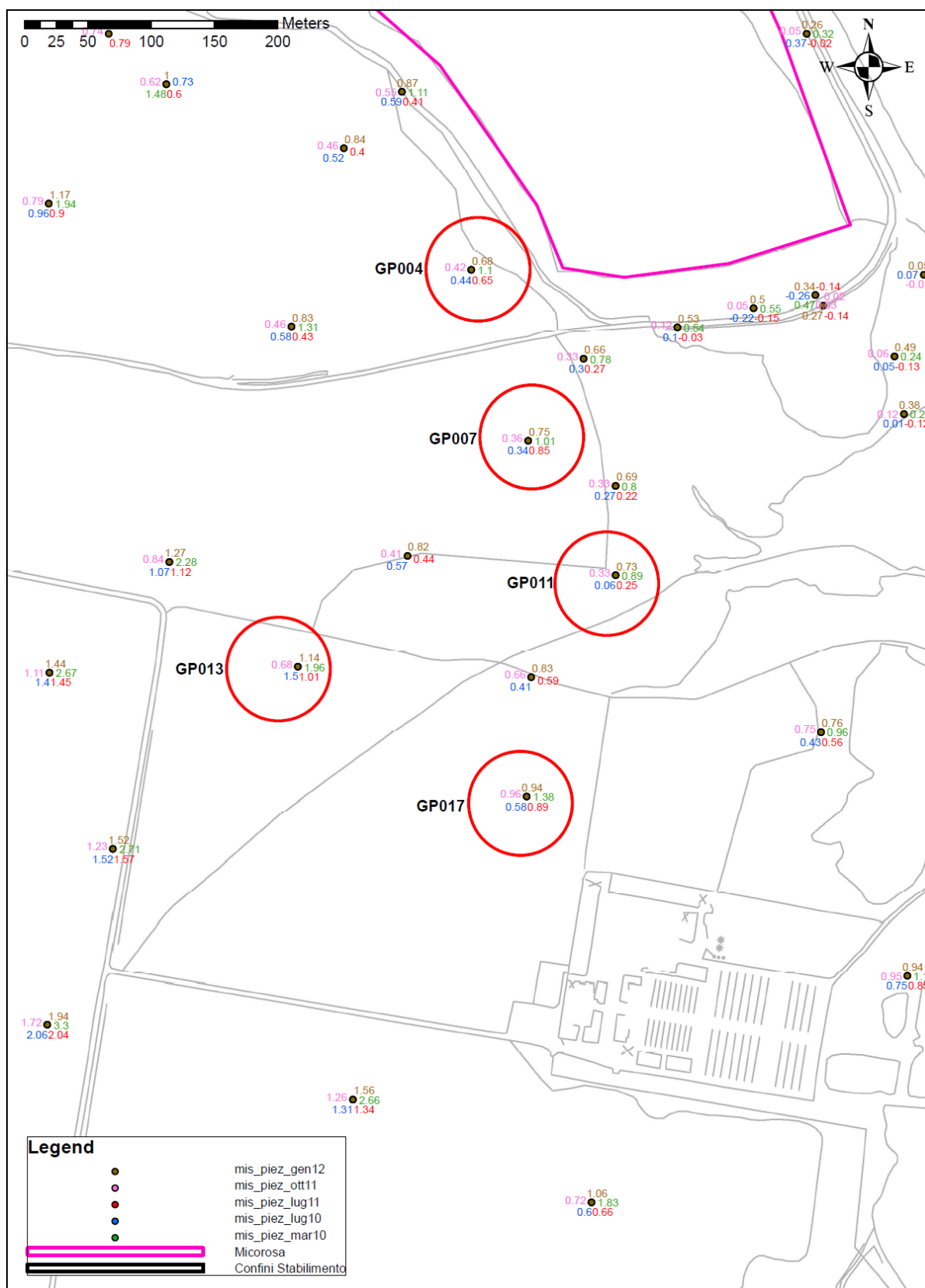


Figura C 2 - Misure rilevate nelle diverse campagne piezometriche.

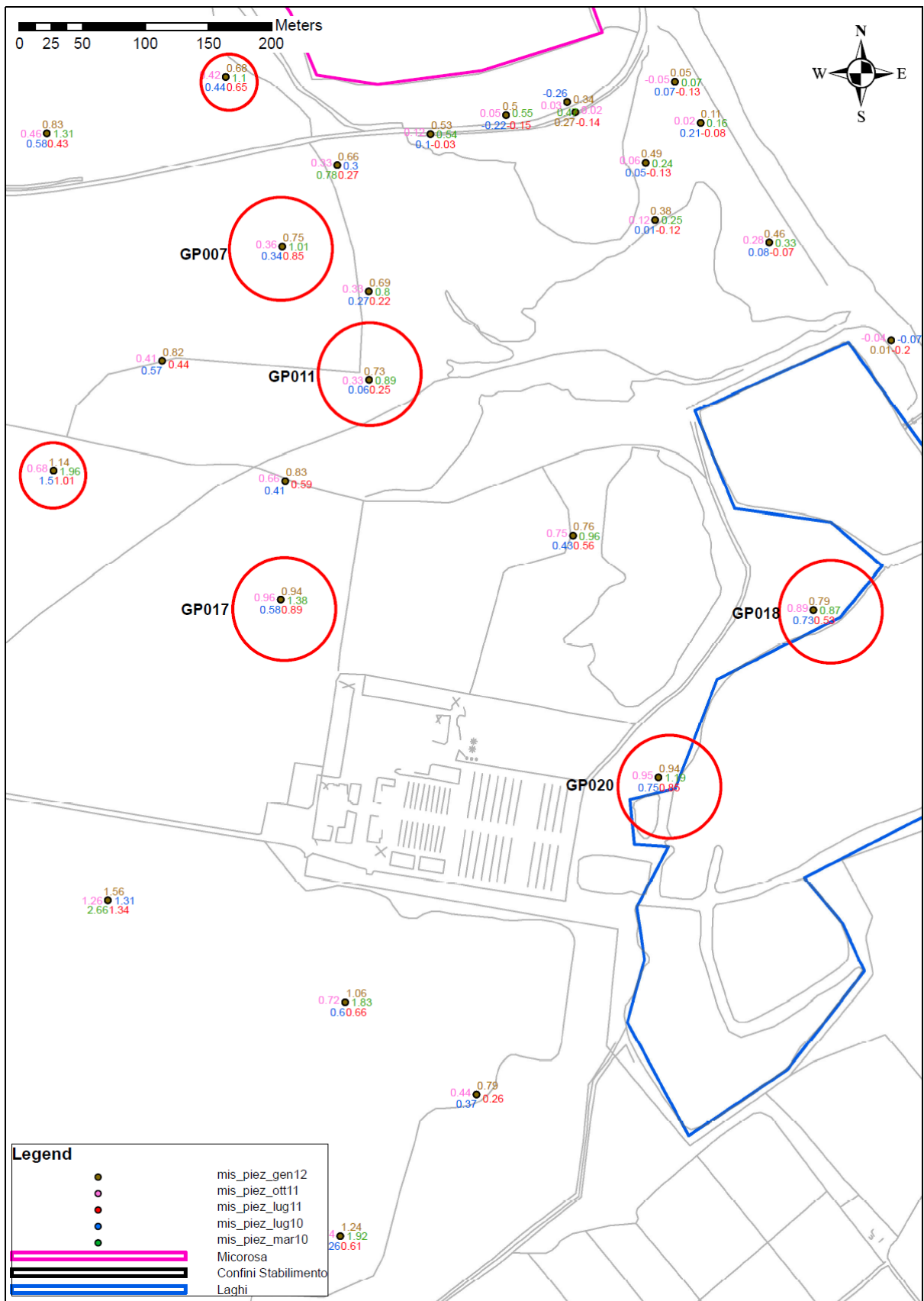


Figura C 3 - Misure rilevate nelle diverse campagne piezometriche.

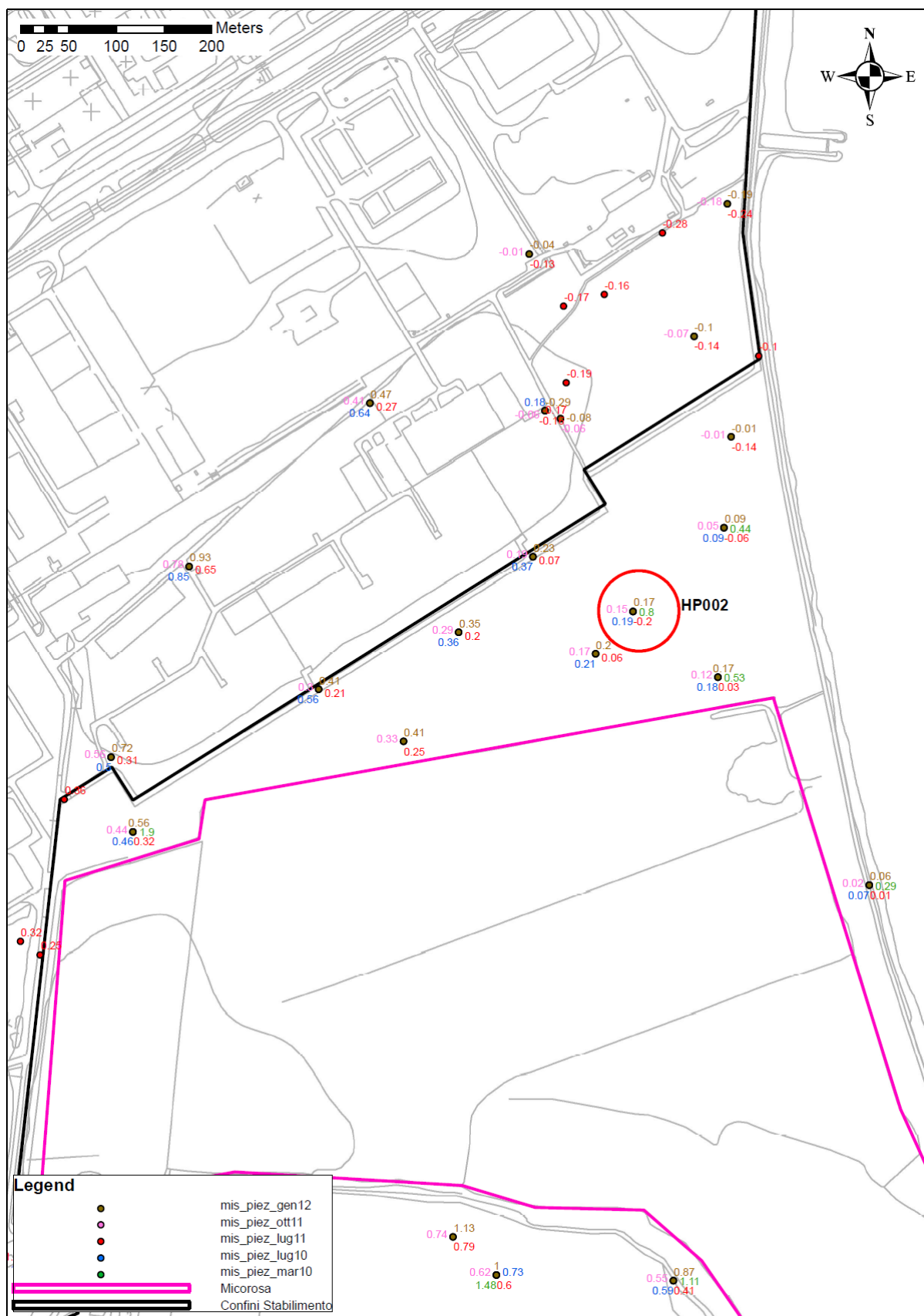


Figura C 4 - Misure rilevate nelle diverse campagne piezometriche.

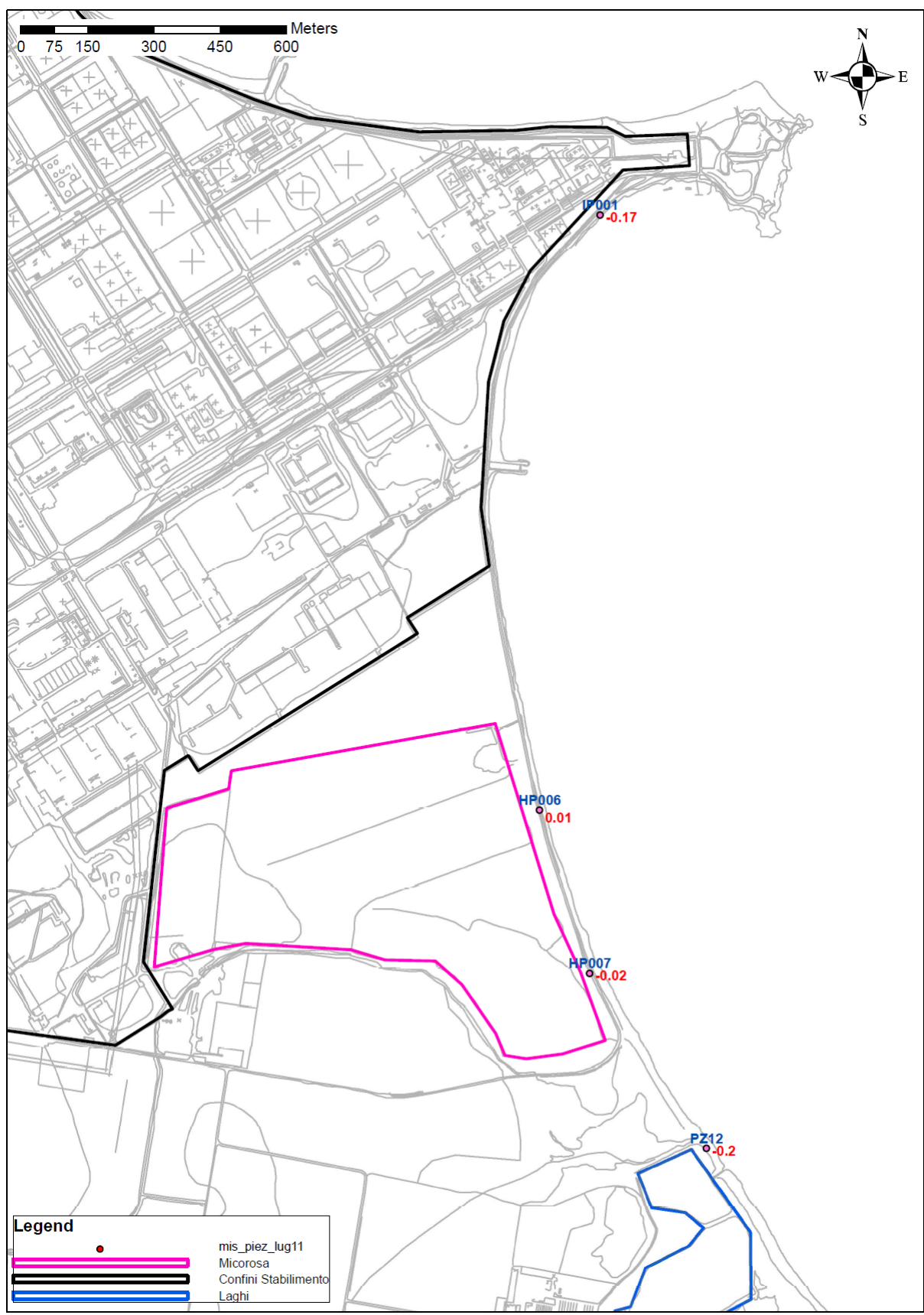


Figura C 5 - Misure rilevate nei piezometri lungo costa nel Luglio 2011 in orari differenti.